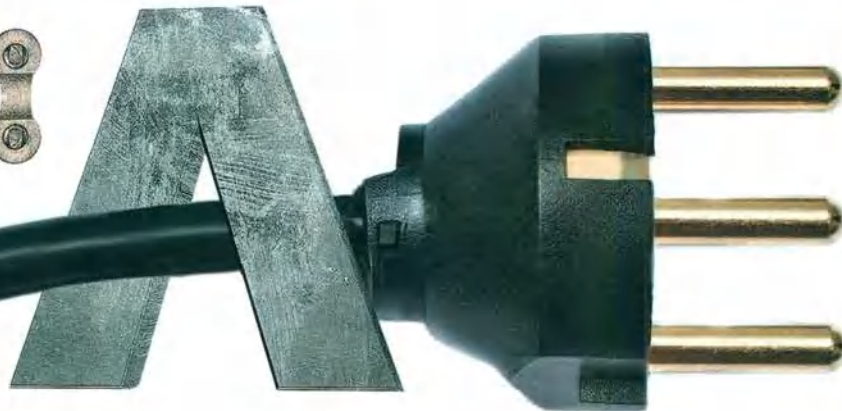
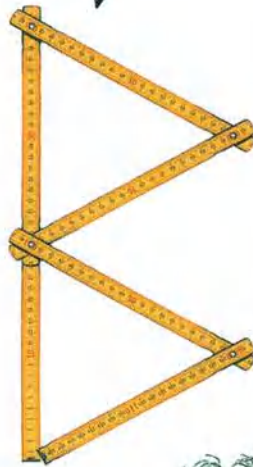


ЛУИС А. БЛУМФИЛД

CoRpus



ПОЛИТЕХ



*Законы физики в нашей жизни*



ЛУИС А. БЛУМФИЛД

# РАБОТАЕТ

*Законы физики в нашей жизни*



*издательство*  
АСТ  
Москва

УДК 53(03)  
ББК 22.3я2

ISBN 978-5-17-085430-1

- © John Wiley & Sons, Inc., 2007 All rights reserved
- © Е. Вакина, перевод на русский язык, главы 5, 7–16, приложение В, 2016
- © Ю. Павлиной, перевод на русский язык, 2016
- © А. Бондаренко, художественное оформление, макет, 2016
- © ООО "Издательство АСТ", 2016
- Издательство CORPUS ©

Профессор Виргинского университета Луис Баумфилд, удостоенный множественных наград за свои исследования в области атомной физики, физики конденсированного состояния и оптики, как никто другой, умеет говорить о науке с широкой аудиторией. Еще мальчиком Баумфилд разобрав на мелкие части асэтки предметов (большинство из которых ему удалось собрать заново) и провеа сотни химических опытов, чтобы понять, как законы науки действуют в обычной жизни. А став ученым, посвятив множеству сил и времени тому, чтобы сделать это знание доступным обычным людям. Созаатель знаменитого курса физики Аля Гуманитариев, Баумфилд уже более авадати лет преподает студентам, выступает по радио и телевидению и не оставляет активной научной работы. Его книга "Как все работает" увлекательно и понятно объясняет, почему лампочки горят, стиральный порошок отстирывает грязь, самолеты летают, айтишны играют музыку, а кухонные ножи не ломаются. Прочитав ее, ни за что не станете разговаривать елу в фольге в микроволновке или краситься при искусственном свете, если у вас свидание в парке. Но самое главное — вы узнаете лучше ориентироваться не просто в современном мире, но и в современной науке.

ISBN 978-5-17-085430-1

Баумфилд, Луис А.  
Как все работает: Законы физики в нашей жизни / Луис А. Баумфилд; пер. с англ. Е. Вакиной и Ю. Павлиной. — Москва: Издательство АСТ: CORPUS, 2016. — 704 с.

Художественное оформление и макет Андрес Бондаренко

Эта книга изана в рамках программы "Книжные проекты Дмитрия Зимина" и при поддержке Политехнического музея.

УДК 53(03)  
ББК 22.3я2  
Б70



## **Книжные проекты Дмитрия Зимина**

Эта книга издана в рамках программы  
“Книжные проекты Дмитрия Зимина”  
и продолжает серию

“Библиотека фонда «Династия»”.

Дмитрий Борисович Зимин —  
основатель компании “Вымпелком” (Beeline),  
фонда некоммерческих программ “Династия”  
и фонда “Московское время”.

Программа “Книжные проекты Дмитрия Зимина”  
объединяет три проекта, хорошо знакомых  
читательской аудитории:  
издание научно-популярных  
книг “Библиотека фонда «Династия»”,  
издательское направление фонда “Московское время”  
и премию в области русскоязычной  
научно-популярной литературы  
“Просветитель”.



# ПОЛИТЕХ

ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ МУЗЕЙ —  
национальный музей науки и техники,  
один из крупнейших научно-технических  
музеев мира. Миссия музея — просвещение  
и популяризация научных и технических знаний:

МЫ ВЕРИМ, ЧТО МИРОМ ДВИЖУТ  
ЛЮБОПЫТСТВО И СОЗИДАНИЕ.

МЫ ОТКРЫВАЕМ ЛЮДЯМ ПРОШЛОЕ,  
НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕЕ НАУКИ.

МЫ СОЗДАЕМ ТЕРРИТОРИЮ ПРОСВЕЩЕНИЯ,  
СВОБОДНОЙ МЫСЛИ И СМЕЛОГО ЭКСПЕРИМЕНТА.

Среди просветительских проектов музея — многочисленные  
выставки, знаменитый Лекторий, Научные лаборатории для  
детей, Фестиваль актуального научного кино,  
а также запущенная в 2014 году издательская программа,  
цель которой — поддержка самых качественных  
научно-популярных книг, отобранных экспертами музея  
и выпущенных в сотрудничестве с лучшими  
издательствами страны.

Вы держите в руках одну из этих книг.

Подробнее о музее и его проектах — на сайте  
[WWW.POLYMUS.RU](http://WWW.POLYMUS.RU)





*Карен — с благодарностью  
за дружбу, мудрость и поддержку,  
Элане и Арону — за энтузиазм,  
вдумчивость и товарищескую помощь  
и Сади — за то, что ты есть*



# ПРЕДИСЛОВИЕ

**В** современном мире наука и порожденная наукой техника окружают нас повсюду. Техника и прикладная наука становятся все более могущественными, из-за чего многим из нас мир кажется все более загадочным, а порой даже зловещим. Мы сталкиваемся с различными экологическими проблемами — например, с опасными последствиями парникового эффекта и необходимостью оптимального выбора источников энергии. В сущности, это базовые технологические задачи, и по поводу того, что есть “истина” в этих и подобных важных научных вопросах, высказываются удивительно разнообразные мнения и сомнения. Часто люди в растерянности и бессилии воздевают руки к небу — им приходится признать, что современный мир постигнуть невозможно, остается только сжаться в комочек и в беспомощном осознании собственного невежества подчиниться его загадочным, необъяснимым законам.

На самом деле и окружающая нас природа, и техника, которую мы используем в повседневной жизни, управляются несколькими фундаментальными физическими законами, и стоит нам разобраться в этих законах, как весь мир и огромное множество технических явлений станут понятными и предсказуемыми. Каким образом микроволновка греет еду? Почему радиоприемник в одном месте ловит хорошо, а в другом плохо? Как умудряются птицы сидеть на проводе высоковольтной линии электропередачи? Ответы на все эти вопросы станут очевидными, если внимать в соответствующие разделы физики.

К сожалению, обычный курс физики, который предлагают типовые учебники, мало чему вас научит. Результаты многочисленных исследований показали, что, вместо того чтобы дать ученикам знания, которые могли бы облегчить жизнь, большинство начальных курсов физики оказывает прямо противоположный эффект: вопреки самым добрым намерениям учителей, основная масса учеников “усваивает”, что физика — это абстрактная, неинтересная наука, никак не связанная с тем, что происходит вокруг.

Книга “Как все работает” преподносит физику по новой методике и тем самым делает огромный шаг к изменению этой ситуации. Вместо того чтобы начать с изложения общих принципов — а это могло бы создать у читателя впечатление, что наука физика скучна и надуманна, — Лу Блумфилд сразу рассказывает о реальных вещах и устройствах, которыми мы пользуемся каждый день. Затем он объясняет принцип действия этих, казалось бы, загадочных устройств с точки зрения фундаментальных физических законов, лежащих в основе их работы. Главные открытия в физике обычно совершались именно по этой схеме — люди задавались вопросом, почему мир вокруг них устроен так, а не иначе, и в конце концов находили законы, которые объясняли и помогали прогнозировать наблюдаемые явления.

Я уже несколько лет пользуюсь на занятиях учебником “Как работают разные вещи”, из которого выросла книга “Как все работает”, и не перестаю восхищаться тем, как Лу берет мудреные с виду технические устройства и, словно кожуру, сдирает с них сложность, демонстрируя простые физические принципы действия этих устройств. Если понять эти принципы, можно с их помощью объяснить устройство бытовой техники у нас дома, а то и починить какую-нибудь вещь, что прежде казалось нам невозможным. Я и сам, пока учил студентов по книге Лу, углубил свое понимание физических законов, на которых зиждется окружающий меня мир. После прочтения книги “Как все работает” я настолько уверился в своих силах, что осмелился вступить в спор с сантехником и мастером по ремонту кондиционеров и заявить им, что их диагнозы ошибочны и что для устранения неисправностей в моем водопроводе и кондиционере надо сделать все совсем по-другому (в конце концов я оказался прав!). Сейчас меня нередко удивляет, на-

сколько некоторые весьма опытные физики не понимают сути обычных бытовых вопросов — таких, например, как принцип работы микроволновой печи: почему в ней нельзя использовать алюминиевую фольгу, хотя ее собственный корпус сделан из металла? Все это убедило меня в том, что и при написании научных работ нам следует чаще использовать методiku, которую предлагает эта книга.

Конечно, самое сильное впечатление книжка производит на моих студентов, которые по ней учатся. Чаще всего это молодые люди, далекие от естественных наук; они специализируются в таких областях, как киноведение, классическая литература, английский язык, бизнес и тому подобных. К физике многие из них относятся со священным трепетом. Отрадно бывает видеть, как они, к своему удивлению, осознают, что физика — это совсем не то, что они думали, что она может быть интересной и полезной, может сделать мир менее загадочным и более доступным пониманию. Я помню немало подобных случаев: один студент, разобравшись, как работают акустические динамики и телевизор, вдруг понял, почему картинка на экране искажается, стоит ему передвинуть большую колонку ближе к телевизору, — в этом нет ничего сверхъестественного, это просто физика, и отныне он знает, как с этим справиться! Студентка, занимавшаяся дайвингом, вникнув в природу света и цвета, вдруг перебила меня и заявила, что теперь она понимает, почему на разной глубине омары кажутся разного цвета; другие студенты наконец нашли объяснение тому факту, что душ на первом этаже общежития работает лучше, чем на втором. Кроме того, всем, конечно же, приятно было узнать, как именно работает микроволновка и зачем нужны эти странные инструкции — что в нее можно класть, а что нет. Такие примеры очень вдохновляют преподавателя, ведь они говорят о том, что студенты не просто зубрят услышанный на лекции материал, а способны извлекать пользу из полученных знаний и применить их по-новому — эффект, который крайне редко дают научные курсы.

Эта книга будет увлекательным и познавательным чтением для всех — и для любознательного дилетанта, и для маститого ученого, и для начинающего студента-физика; оттого что мир оказался не таким чужим и таинственным, всем станет только легче.

КАРА УИМАН,  
*лауреат Нобелевской премии по физике (2001),  
в 2004 году Советом по развитию  
и поддержке образования и Фондом Карнеги  
избран профессором года в США.*

# СОДЕРЖАНИЕ

11	<i>Предисловие</i>		
17	<b>ГЛАВА 1</b> <b>ДВИЖЕНИЕ ТЕЛ</b>	<b>1.1</b> Коньки <b>1.2</b> Падение мяча <b>1.3</b> Наклонные плоскости	18 26 33
45	<b>ГЛАВА 2</b> <b>ЕЩЕ О ДВИЖЕНИИ ТЕЛ</b>	<b>2.1</b> Качели <b>2.2</b> Колеса <b>2.3</b> Аттракцион "Автодром"	46 57 66
77	<b>ГЛАВА 3</b> <b>МЕХАНИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА</b>	<b>3.1</b> Пружинные весы <b>3.2</b> Отскок мяча <b>3.3</b> Карусели и американские горки	78 88 98
105	<b>ГЛАВА 4</b> <b>ЕЩЕ О МЕХАНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ</b>	<b>4.1</b> Велосипеды <b>4.2</b> Ракеты и космические полеты <b>4.3</b> Земля, Ауна и Солнце <b>4.4</b> Лифты	106 114 127 135
143	<b>ГЛАВА 5</b> <b>ТЕКУЧИЕ СРЕДЫ — ЖИДКОСТИ И ГАЗЫ</b>	<b>5.1</b> Воздушные шары <b>5.2</b> Водопровод	144 156
167	<b>ГЛАВА 6</b> <b>КАК РАБОТАЮТ ПОТОКИ</b>	<b>6.1</b> Как правильно полить сад <b>6.2</b> Мяч и воздух <b>6.3</b> Самолеты <b>6.4</b> Пылесосы	168 178 186 208
215	<b>ГЛАВА 7</b> <b>ТЕПЛО И ТЕПЛОПЕРЕДАЧА</b>	<b>7.1</b> Печи <b>7.2</b> Вода, пар и лед <b>7.3</b> Лампы накаливания <b>7.4</b> Одежда и теплоизоляция <b>7.5</b> Термометры и термостаты	216 230 237 245 255
267	<b>ГЛАВА 8</b> <b>ГДЕ И КАК РАБОТАЕТ ТЕПЛО</b>	<b>8.1</b> Кондиционеры <b>8.2</b> Автомобили <b>8.3</b> Атмосфера <b>8.4</b> Очистка воды	268 276 293 302

311	<b>ГЛАВА 9</b> КОЛЕБАНИЯ И МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ	9.1 Часы 9.2 Музыкальные инструменты 9.3 Море	312 321 333
341	<b>ГЛАВА 10</b> ЭЛЕКТРИЧЕСТВО	10.1 Статическое электричество 10.2 Копировальные аппараты 10.3 Электрические фонарики	342 351 362
371	<b>ГЛАВА 11</b> МАГНИТЫ И ЭЛЕКТРОМАГНИТЫ	11.1 Магниты у нас дома 11.2 Распределение электроэнергии 11.3 Электрические генераторы и двигатели 11.4 Поезда на магнитной подушке 11.5 Магнитная запись	372 382 393 404 411
419	<b>ГЛАВА 12</b> ЭЛЕКТРОНИКА	12.1 Блоки питания 12.2 Аудиоплееры	420 434
449	<b>ГЛАВА 13</b> ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ	13.1 Радио 13.2 Микроволновые печи 13.3 Телевидение	450 458 464
475	<b>ГЛАВА 14</b> СВЕТ	14.1 Солнечный свет 14.2 Газоразрядные лампы 14.3 Лазеры и светодиоды 14.4 Краски и макияж	476 483 492 498
511	<b>ГЛАВА 15</b> ОПТИКА	15.1 Фотоаппараты и зрение 15.2 Оптическая запись и связь 15.3 Телескопы и микроскопы	512 528 539
549	<b>ГЛАВА 16</b> ДОСТИЖЕНИЯ СОВРЕМЕННОЙ ФИЗИКИ	16.1 Ядерное оружие 16.2 Ядерные реакторы 16.3 Медицинская диагностика и радиация	550 564 573
583	<b>ГЛАВА 17</b> ВЕЩИ И ВЕЩЕСТВА	17.1 Ножи и сталь 17.2 Окна и стекло 17.3 Пластмассы	584 593 606

617	<b>ГЛАВА 18</b>	<b>18.1</b> Переработка нефти	618
	<b>ПО ЗАКОНАМ</b>	<b>18.2</b> Стирка	634
	<b>ХИМИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ</b>	<b>18.3</b> Батарейки	649

---

## **ПРИЛОЖЕНИЯ**

663	<i>Приложение А. Немного математики</i>
665	<i>Приложение Б. Единицы измерения и перевод единиц</i>
669	<i>Глоссарий</i>
689	<i>Источники фотографий</i>
691	<i>Предметно-именной указатель</i>





## ГЛАВА 1

# ДВИЖЕНИЕ ТЕЛ

---

**К**ак физик я особенно люблю вопросы “как” и “почему”. Наверное, вопросы “что”, “где” и “когда” тоже по-своему интересны, но именно “как” и “почему” изначально породили физику и прочие естественные науки. Следуя этой традиции и отвечая в нашей книге на коротенький (но столь непростой) вопрос “как все работает”, мы словно заново совершим великие физические открытия.

Когда вы приметесь читать эту книгу, на вас обрушится лавина научной информации, но пусть вас это не пугает. Вы будете познавать физику не спеша, постепенно, на примере обыденных жизненных ситуаций и реальных предметов. Однако подобная методика изучения не просто облегчает образовательный процесс. Эта методика также демонстрирует, насколько полезно знать физику. Ведь физика не только объясняет устройство нашего сегодняшнего мира, но и позволяет составить необходимые прогнозы на будущее.

Для меня всегда было загадкой, почему физика традиционно преподается как абстрактная наука — ведь она изучает вещественный мир и законы, которыми тот управляется. Может быть, физические явления кажутся не слишком интересными и не очень уместными в контексте повседневной жизни и поэтому не заслуживают внимания? Или, может быть, сама физика — слишком деликатная материя для повседневного использования? Я убежден в обратном: если лишить физику бесчисленных примеров из живого, реального мира, она не будет иметь ни основы, ни формы — словно молочный коктейль без стакана.

Если вам кажется, что разговоры о физике в контексте повседневности понижают ее высокий статус, делают ее какой-то слишком обыкновенной, то открою вам секрет: физика и в самом деле совершенно обыкновенна. В исследовательских лабораториях не творится ничего сверхъестественного — ничего такого, что не происходило бы вокруг нас ежедневно и всегда. Цель этой книги — раскрыть роль физики в обычной жизни, а также показать вам, как с помощью науки можно объяснить происходящее и повлиять на ход событий.

Для начала мы проделаем в этой и следующей главах вот что: познакомимся с языком физики, которым будем пользоваться на протяжении всей книги, и с основными законами движения, на которых зиждется все мироздание. Затем мы рассмотрим темы, более интересные и важные как сами по себе, так и в связи с научными проблемами, которые в них коренятся. Но две первые главы особенно важны, поскольку станут введением в собственно науку физику. И асы науки, и “чайники”, изучив главу “Движение тел”, будут лучше ориентироваться в дальнейшем материале.

- 18 **1.1 Коньки**  
*Как движутся предметы, если их не подталкивать.*
- 26 **1.2 Падение мяча**  
*Как гравитация влияет на движение.*
- 33 **1.3 Наклонные плоскости**  
*Как пандус помогает поднимать тяжести.*



## 1.1 Коньки

❶ Греческий философ Аристотель (384–322 до н. э.) считал, что скорость движения тел пропорциональна действующим на них силам. Эта теория правильно предсказывала поведение скользящего тела, но ошибочно предполагала, что тяжелые тела падают быстрее легких. Тем не менее концепция Аристотеля долгое время была общепринятой, отчасти из-за того, что не получалось выстроить более простую и полную теорию, а отчасти потому, что развитие научных методов, способных связать теорию и практические наблюдения, было еще впереди.

Как и многие другие виды спорта, катание на коньках требует большего мастерства, чем кажется на первый взгляд. Если вы впервые встали на коньки (или на ролики), то вам, скорее всего, предстоит снова и снова падать и вновь подниматься на ноги со льда (или с асфальта), и надо будет потренироваться, прежде чем вы научитесь плавно скользить вперед и благополучно останавливаться. Но физические основы всех этих движений на удивление просты — что для роликовых коньков, что для обычных. По ровной плоскости на коньках, носки которых смотрят вперед, вы катитесь равномерно и прямолинейно — по инерции!

Движение по инерции — одно из основных явлений в физике, с него-то мы и начнем. В этом разделе мы поговорим о трении в связи со стартом, остановкой и поворотом конькобежца, а все вместе поможет нам понять некоторые базовые законы движения. Изучив процесс катания на коньках, мы продвинемся к пониманию фундаментальных законов, управляющих движением, и таким образом подготовимся ко многим другим темам, затронутым в этой книге.

### Скольжение вперед; инерция и движение по инерции

Надев коньки, попробуйте представить себе, что происходит с конькобежцем, которого никто и ничто не подталкивает. Если девушка на рисунке не испытывает действия никаких внешних сил (рис. 1.1.1), если ее никто не толкает и не тянет вперед, останется ли она на месте? Поедет? Начнет набирать скорость? Покатится медленнее? Короче говоря, что с ней произойдет?

Ответ на этот вроде бы простой вопрос люди искали не одну тысячу лет; даже Аристотель — пожалуй, самый образованный философ Античности — заблуждался на этот счет <sup>1</sup>. Проблема осложняется тем, что на поверхности Земли тела никогда не бывают абсолютно свободны от внешних воздействий — напротив, они толкают друг друга, трутся друг о друга или взаимодействуют как-то иначе.

В конце концов знаменитый итальянский астроном, математик и физик Галилео Галилей <sup>2</sup>, потратив годы на тщательные наблюдения и теоретический анализ, нашел ответ на этот вопрос. Решение, к которому пришел Галилей, оказалось столь же простым, сколь простой казалась и сама загадка: если человек неподвижен, он и останется неподвижным; если он движется в определенном направлении, он так и будет двигаться по прямой в том же направлении с неизменной скоростью. Это свойство тел двигаться равномерно и прямолинейно в отсутствие внешних сил называется инерцией.

### Инерция

Движущееся тело стремится продолжить движение; тело, которое находится в состоянии покоя, стремится остаться на месте.

Аристотелю помешало обнаружить инерцию главным образом трение, и по той же причине мы не всегда замечаем ее. Если вы попытаетесь заскользить по полу в обычной обуви, трение будет замедлять ваше движение до тех пор, пока вы не остановитесь, и замаскирует действие инерции. Чтобы инерция стала более явной, надо избавиться от трения. Вот для этого вы и надеваете коньки.

Коньки почти полностью устраняют трение — по крайней мере, в одном направлении, — так что вы можете без усилий катиться вперед на ледовых или роликовых коньках и ощущать собственную инерцию. Для упрощения картины рассмотрим идеальные коньки, которые при движении вовсе не испытывают воздействия трения. Кроме того, в этом и ближайших разделах давайте позабудем не только о трении, но и о сопротивлении воздуха. В самом деле, если нет сильного ветра и если вы катитесь не слишком быстро, сопротивление воздуха не так уж существенно.

Итак, вы готовы выйти на каток, и мы приступаем к изучению пяти важных физических величин, связанных с движением; посмотрим, как они соотносятся друг с другом. Это радиус-вектор, скорость, масса, ускорение и сила.

Сначала опишем ваше местоположение. В каждый момент времени вы находитесь в какой-то определенной точке пространства. Всякий раз, когда мы описываем ваше местоположение, мы говорим о расстоянии от некоей точки отсчета до точки, в которой находитесь вы, и о направлении от первой к последней — скажем, “столько-то метров к северу от киоска с мороженым” или “столько-то километров к западу от Кливленда”. Иначе говоря, положение характеризуется радиус-вектором относительно точки отсчета.

Сам же радиус-вектор, как любая векторная величина, характеризуется модулем (численным значением) и направлением; модуль говорит о длине вектора, а направление — о том, в какую сторону он смотрит. Векторы встречаются в природе повсеместно. Если вам доведется иметь дело с вектором, обратите внимание на его направление; рассчитывая найти клад “в 30 шагах от старого дуба”, не упустите дополнительное указание “в 30 шагах к востоку от старого дуба”, иначе копать придется очень долго.

Итак, вы встали на коньки на ноги и поехали. В процессе движения ваше положение (радиус-вектор) меняется. Иначе говоря, вы перемещаетесь с определенной скоростью. Скорость показывает, как быстро меняется радиус-вектор; это вторая векторная величина в нашем списке, которая характеризуется модулем (численным значением) и направлением движения. Скорость — это путь, который вы проделываете за данный промежуток времени:

$$\text{скорость} = \frac{\text{расстояние}}{\text{время}}.$$

А направлено движение может быть, скажем, на восток или на север (или вниз — если вы упадете).

Но если вы скользите свободно и ничто не толкает вас в горизонтальном направлении, вашу скорость описать совсем просто. Поскольку вы движетесь



**Рис. 1.1.1.** Эта девушка на роликах не испытывает воздействия никаких внешних горизонтально направленных сил. Если она неподвижна, она останется неподвижной, если она движется, то продолжит движение.

<sup>2</sup> Когда итальянский ученый Галилео Галилей (1564–1642) был профессором Пизанского университета, он должен был преподавать в том числе и натурфилософию Аристотеля. Смущенный тем, что теории Аристотеля противоречат тому, что мы наблюдаем в природе, Галилей экспериментально измерил скорость падения тел и показал, что для всех тел она одинакова.

3 В 1664 году Кембриджский университет, студентом которого тогда был сэра Исаак Ньютон (1642–1727), закрыли на полтора года из-за эпидемии чумы. Ньютон удалился в деревню, где он открыл законы механики и тяготения, а также разработал математические основы дифференциального и интегрального исчисления. Эти открытия, как и свой вывод о том, что небесные тела, например, Луна, подчиняются тем же простым физическим законам, что и земные предметы, такие как яблоко (для того времени это была новаторская идея), Ньютон изложил в сочинении под названием *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* (“Математические начала натуральной философии”), опубликованном в 1687 году. Эту работу, пожалуй, можно считать важнейшим и самым авторитетным научным и математическим трудом всех времен.

4 На явлении инерции, которая удерживает неподвижные предметы в неподвижности, основано множество повседневных бытовых процессов. Острые вращающиеся ножи газонокосилки режут неподвижную траву, благо инерция не дает травинкам отклоняться в сторону. Точно так же блендеры, кухонные комбайны и некоторые модели кофемолок могут измельчать продукты и превращать их в порошок, потому что кусочки продуктов остаются неподвижными благодаря собственной инерции. Даже для того, чтобы просто оторвать лист от рулона кухонных бумажных полотенец, необходима инерция, которая удерживает рулон в неподвижности.

равномерно и прямолинейно, скорость не меняется — она постоянна. Допустим, вы катитесь на запад со скоростью 10 метров в секунду — эта скорость будет сохраняться бесконечно долго. 10 метров в секунду означает, что, двигаясь с такой скоростью в течение одной секунды, вы проезжаете 10 метров. При сохранении такой постоянной скорости за 10 секунд вы преодолеете 100 метров, за 100 секунд — 1000 метров и так далее. Более того, ваш путь представляет собой прямую линию. Иными словами, вы движетесь равномерно и прямолинейно, по инерции.

Коньки помогают нам переформулировать прежнее определение инерции с учетом понятия скорости: тело, не подверженное влиянию внешних факторов, движется с постоянной скоростью и за равные промежутки времени проходит равные отрезки пути по прямой. Это положение часто называют первым законом механики Ньютона — в честь его автора, английского математика и физика, сэра Исаака Ньютона 3. Внешние факторы, влияющие на движение, именуется силами — это научный термин для разнообразных толчков и тяги. О различных примерах проявления инерции в быту см. 4.

---

### Первый закон Ньютона

Тело, не подверженное воздействию внешних сил, движется с постоянной скоростью и за равные промежутки времени покрывает равные расстояния по прямой.

---

---

### Голос интуиции: движение по инерции

Интуиция подсказывает нам, что, если тело не подталкивать, оно замедлит движение и остановится; чтобы тело все время двигалось, его надо толкать.

Физика утверждает, что, если тело не подталкивать, оно движется по инерции с постоянной скоростью.

**Вывод:** на тело обычно действуют также и скрытые силы, такие как трение и сопротивление воздуха, которые заставляют его замедлиться. Избавиться от действия этих сил трудно, поэтому движение тел по инерции в чистом виде, в отсутствие внешних сил, наблюдается редко.

---

### Альтернатива движению по инерции: ускорение

---

Когда вы скользите вперед по горизонтальной плоскости и ничто вас не подталкивает, что помогает вам сохранить постоянную скорость и направление? Ваша масса. Масса — это мера инерции и способности сопротивляться изменению скорости. Массу имеет почти все во Вселенной. Вы имеете массу, поэтому ваша скорость изменится только в том случае, если что-то вас толкнет, то есть если вы испытаете на себе действие силы. Вы будете двигаться равномерно и прямолинейно, пока к вам не будет почему-либо приложена сила, которая остановит вас или направит в другую сторону. Сила — это третья векторная величина, имеющая модуль и направление. И в самом деле, совсем не все равно, куда вас толкнут — влево или вправо!

Если что-то вас толкает, ваша скорость меняется; иными словами, вы движетесь с ускорением. Ускорение, четвертый вектор в нашем списке, служит мерой изменения скорости. Ускорение — это любое изменение скорости, будь то собственно увеличение темпа движения, замедление или даже поворот. Если ваша скорость меняется по величине и/или вы меняете направление движения, значит, вы двигаетесь с ускорением!

Как и положено вектору, ускорение имеет модуль и направление. Чтобы понять роль обоих параметров, представьте себе, что вы стоите у стартовой линии на ледовой дорожке и ждете команды к началу забега. Раздался выстрел, и вы помчались! Вы отталкиваетесь коньками ото льда и начинаете ускорять бег — ваша скорость увеличивается, вы бежите все быстрее и быстрее. Численное значение ускорения зависит от того, насколько сильно твердая поверхность толкает вас вперед. На длинной дистанции рывок не нужен, и вы набираете полную скорость не сразу. Лед мягко посылает вас вперед, а модуль ускорения невелик. Скорость меняется медленно. Но если это спринт и вам надо разогнаться до максимальной скорости как можно быстрее, вы рванете с места, и со стороны льда к вам будет приложена очень большая сила. Мо-

дуль ускорения велик, скорость меняется быстро. В этом случае вы физически ощутите, как инерция противостоит вашим попыткам набрать скорость.

Но ускорение не сводится к одной только величине. На старте вы выбираете еще и направление ускорения — направление, в котором будет меняться со временем ваша скорость. Ускорение направлено туда же, куда и сила, его вызвавшая. Если со стороны льда исходит сила, которая посылает вас вперед, ускорение тоже направлено вперед — ваша скорость все больше и больше меняется по направлению к финишу. Если же вы сделаете что-то не так и сила, действующая на вас со стороны льда, вдруг сменит направление на боковое, то вашим соперникам придется уворачиваться от вас, пока вы будете стремительно лететь прямо в бортик. И до самого финиша они будут потешаться над вами — как можно было так недооценить значение направления в определении силы и ускорения!

Как только вы достаточно разгонитесь, можно прекратить борьбу с инерцией и просто скользить. Вы катитесь вперед по инерции с постоянной скоростью. Теперь инерция вам помогает: она заставляет вас двигаться равномерно, хотя ничто вас не подталкивает. Напомню, что трением и сопротивлением воздуха мы пренебрегли. В реальной жизни эти силы толкают вас назад и постепенно замедляют скольжение. Однако в этом разделе мы их не учитываем, поэтому вы катитесь плавно и равномерно.

Но даже не пытаясь поехать быстрее или медленнее, вы все равно можете двигаться с ускорением. Когда вы маневрируете или преодолеваете препятствие, на вас действуют силы, направленные вбок или вверх-вниз; они меняют направление вашего движения и тем самым придают вам ускорение.

Наконец дистанция пройдена, пора останавливаться, вы тормозите. И вновь вы движетесь с ускорением. На этот раз ускорение направлено назад, против направленной вперед скорости. Обычно мы называем такой процесс замедлением, хотя на самом деле это особый тип ускорения. Направленная вперед скорость постепенно уменьшается до вашей полной остановки.

Приведем примеры движения тел с ускорением, чтобы вы лучше поняли этот феномен:

1. Бегун на старте делает резкий рывок вперед — вектор его скорости меняется от нуля до ненулевого, направленного вперед, поэтому ускорение спортсмена направлено вперед.
2. Велосипед останавливается перед пешеходным переходом — вектор его скорости был направлен вперед, а стал равен нулю, то есть ускорение велосипеда направлено назад (велосипед замедлил ход).
3. Лифт начинает подниматься с первого этажа на пятый — вектор его скорости изменился с нулевого на ненулевой, направленный вверх, поэтому ускорение лифта направлено вверх.
4. Лифт, поднявшийся с первого этажа, останавливается на пятом — вектор его скорости был направлен вверх, а стал нулевым, стало быть, ускорение направлено вниз.
5. Автомобиль берет влево, чтобы обогнать другой автомобиль, — вектор его скорости был направлен вперед, а теперь направлен вперед и влево, поэтому ускорение направлено влево.
6. Самолет начинает снижаться — вектор его скорости был направлен вдоль горизонтального воздушного коридора, а теперь направлен вниз и вперед, поэтому ускорение направлено почти прямо вниз.
7. Дети катаются на карусели — их скорость постоянна, но направление движения постоянно меняется. О направлении ускорения в этом случае мы поговорим в разделе 3.3.

А вот примеры случаев, когда ускорение отсутствует:

1. Припаркованный автомобиль — вектор его скорости всегда равен нулю.
2. Автомобиль едет прямо по ровному шоссе с постоянной скоростью — не меняется ни модуль скорости, ни направление движения.
3. Велосипед едет вверх по ровному склону с постоянной скоростью — не меняется ни модуль скорости, ни направление движения.

4. Лифт едет вверх с постоянной скоростью и находится на полпути между первым этажом и пятым — не меняется ни модуль скорости, ни направление движения.

Ускорение сложнее понять, чем скорость. Приходится какое-то время внимательно следить за человеком на коньках, чтобы понять, движется он с ускорением или нет. Если траектория движения конькобежца криволинейная или если его скорость меняется по величине, значит, конькобежец катится с ускорением.

## Влияние сил на конькобежца

Теперь, когда мы знаем, что такое ускорение, давайте посмотрим, как именно возникает ускорение в ответ на действие той или иной силы. Прежде всего оно зависит от величины этой силы — чем она больше, тем большим будет ускорение. Но ускорение зависит и от массы — чем вы тяжелее, тем меньше ускорение (**рис. 1.1.2**). То есть до того, как вы плотно пообедали, изменить скорость вашего движения легче, чем после него.

Действующая на вас сила, ваша масса и ускорение связаны простой зависимостью. Ускорение равно приложенной к вашему телу силе, деленной на массу вашего тела, или

$$\text{ускорение} = \frac{\text{сила}}{\text{масса}} \quad (1.1.1).$$

Направление же ускорения, как мы уже видели, совпадает с направлением действующей на вас силы.

Ньютон вывел это уравнение из собственных наблюдений над движением, и нам оно известно как второй закон Ньютона. Формула подчеркивает отличие причины (силы и массы) от следствия (ускорения). Однако это равенство принято записывать иначе, чтобы избежать деления. Тогда уравнение приобретает традиционный вид:

$$\text{сила} = \text{масса} \times \text{ускорение} \quad (1.1.2).$$

Напомним, что в уравнении 1.1.2 направления ускорения и силы совпадают (удобный способ определения массы тела с помощью этого равенства описан в **9**).

### Второй закон Ньютона

Сила, действующая на тело, равна произведению его массы на ускорение. Направление ускорения совпадает с направлением силы.

Обе части уравнения 1.1.1 равны (раз уж это уравнение). Ваше ускорение равно действующей на ваше тело силе, деленной на вашу массу. Поскольку ваша масса постоянна (если только вы не слишком засиделись в ресторане), то уравнение 1.1.1 говорит, что увеличение силы сопровождается таким же ростом ускорения. Таким образом, чтобы части уравнения сохранились равными, при увеличении правой его части должна увеличиться и левая. То есть чем сильнее вас толкнуть, тем быстрее изменится вектор вашей скорости в направлении толчка.

Можно сравнить и действие равных сил на два тела с разными массами. Допустим, слева от вас сидит бывший борец сумо. Предположим — просто для примера, — что из вас двоих вы обладаете меньшей массой. Из уравнения 1.1.1 следует, что увеличение массы приводит к соответствующему росту ускорения. Можно с уверенностью сказать, что, если на вас обоих будет оказано одинаковое воздействие, ваша скорость изменится быстрее, чем скорость борца.

Итак, мы рассмотрели пять начал физики:

1. Радиус-вектор точно указывает ваше положение в пространстве.
2. Вектор скорости показывает, как быстро меняется радиус-вектор.
3. Ускорение показывает, как быстро меняется вектор скорости.
4. Для того чтобы заставить вас двигаться с ускорением, нечто должно воздействовать на вас с определенной силой.
5. Чем больше масса, тем меньшее ускорение вызывает данная сила.

**9** Проще всего определить массу предмета, если ритмично покачать его в разные стороны и понаблюдать его ускорение. Чем больше масса, тем меньше он будет ускоряться в ответ на ваши усилия. Даже если закрытый ящик слишком тяжел для того, чтобы поднять его или взвесить, вы можете, покачав ящик, понять, насколько он заполнен.



**Рис. 1.1.2.** Ударив по мячу, футболист с легкостью сообщит ему ускорение, потому что масса мяча относительно невелика. Но что будет, если он ударит по гораздо более тяжелому шару для боулинга?

Кроме того, мы познакомились с пятью важными физическими понятиями — массой, силой, ускорением, скоростью и радиус-вектором, а также с некоторыми связывающими их закономерностями. Многие основные положения физики базируются на этих величинах и взаимосвязи между ними.

Процесс катания на коньках совершенно точно описывается с помощью этих понятий. Теперь мы знаем, что, если нет никаких горизонтально направленных сил, вы либо стоите на месте, либо катитесь по прямой с постоянной скоростью. Для того чтобы вы могли начать движение, остановиться или повернуть, нечто должно подтолкнуть вас в горизонтальной плоскости, и это нечто — лед или дорожное покрытие. Мы еще не обсудили, каким образом на вас действуют горизонтальные силы со стороны льда и дорожного покрытия — этот вопрос мы оставим на потом. Но, катаясь на коньках, не забывайте об этих силах и следите за тем, как они меняют вашу скорость или направление движения, а иногда и то и другое. Попробуйте проследить за своим ускорением.

## Катание в компании: система координат

---

Одному кататься спокойнее, зато в компании обычно намного веселее. Есть с кем поболтать и перед кем блеснуть техникой и ловкостью.

Однако если на катке находится сразу несколько человек, важно правильно оценить ситуацию. Когда вы плавно скользите мимо вашего приятеля (а он в это время столь же плавно движется вам навстречу), происходящее вокруг вас видится вам обоим по-разному. Если смотреть с вашей точки зрения, то вы стоите на месте, а ваш товарищ перемещается. Ему же кажется, что он неподвижен, а перемещаетесь вы. Кто же прав?

Оказывается, правы вы оба, и физика предлагает объяснение этому очевидному парадоксу. Каждый из вас наблюдает за событиями в своей инерциальной системе отсчета, с позиции свободного тела, то есть тела, которое не имеет ускорения и движется согласно первому закону Ньютона. Одно из самых замечательных открытий Галилея и Ньютона заключается в том, что физические законы справедливы для любой инерциальной системы отсчета. В инерциальной системе отсчета все, что вы видите, подчиняется законам движения, которые мы с вами изучаем. Наверно, немного странно, что пейзаж вокруг вас движется, но ваша инерциальная система отсчета ничем не хуже любой другой, и в вашей системе отсчета вы пребываете в покое посреди движущегося ландшафта.

Поскольку и вы, и ваш друг двигаетесь по инерции, вы оба видите мир из инерциальной системы отсчета, а окружающие вас объекты перемещаются в полном соответствии с законами движения. Одни тела движутся с постоянной скоростью, другие — с ускорением под воздействием каких-либо сил. Но из-за того что вы с приятелем наблюдаете за этими телами в разных системах отсчета, каждый из вас может по-своему оценивать значения измеряемых физических величин.

В данном случае вам кажется, что вы стоите, потому что вы наблюдаете за окружающим в инерциальной системе отсчета, связанной с вами. В этой системе отсчета ваш друг катится равномерно и прямолинейно на запад со скоростью 2 метра в секунду. Но он видит мир иначе. В связанной с ним инерциальной системе отсчета он сам неподвижен, а вы катитесь равномерно и прямолинейно на восток со скоростью 2 метра в секунду. До тех пор пока вы не попытаетесь сравнить положение и скорости наблюдаемых тел, а также производные физические величины, никаких споров и недопонимания между вами не возникнет. Но если вы, зазевавшись, въедете в бортик и начнете объяснять приятелю, что вы-то стояли на месте, а бортик вдруг ни с того ни с сего сам наехал на вас, не рассчитывайте на сочувствие: ваш товарищ видел происходящее совсем иначе.

В этой книге мы будем выбирать для каждого тела ту или иную инерциальную систему отсчета, в которой и станем описывать поведение данного тела. Обычно мы выбираем такую систему отсчета, чтобы все перемещения в ней выглядели как можно проще, и далее остаемся в этой системе. Какую систему отсчета лучше всего выбрать, как правило, настолько очевидно, что мы делаем это не задумываясь.

Но иногда приходится предъявлять к системе отсчета особые требования. Напоследок скажу, что существуют строгие правила работы с двумя и более инерциальными системами отсчета одновременно, но эту тему я оставляю для следующей книги.

## Знай меру: единицы измерения

Если вы попросите в бакалейной лавке “шесть сахара”, продавец не поймет, сколько вам отвесить. Само по себе число 6 несет недостаточно информации, следует уточнить, какие единицы измерения вы имеете в виду — чашки\*, фунты, куски или тонны. Точно так же приходится уточнять, какие меры вы имеете в виду, говоря практически о любой физической величине — скорости, силе, массе и прочем. Это вынудило нас придумать единицы измерения (их называют также условными единицами), которые устроили бы всех.

Например, когда вы говорите, что скорость конькобежца равна 20 милям в час, то в качестве условной единицы измерения скорости вы выбираете меру “миля в час” и утверждаете, что конькобежец движется в 20 раз быстрее этой величины. Вы можете представить скорость конькобежца как величину, кратную любой условной единице измерения скорости — скажем, футов в секунду, ярдов в день, дюймов в столетие, — и всегда найдете простые соотношения, помогающие преобразовать одни единицы измерения в другие. Например, для того, чтобы перевести мили в час в километры в час, надо умножить значение скорости на 1,609 (именно столько километров в миле). Таким способом можно подсчитать, что ваш конькобежец движется со скоростью 32,2 км/ч.

Многие американские единицы измерения заимствованы из старой английской системы единиц, которую в большинстве стран сменила Международная система единиц, или СИ (SI, сокращение французского термина *Système Internationale d'Unités*). Но в США (и некоторых других странах) по-прежнему используются английские единицы, что нередко осложняет жизнь. Например, вы хотите испечь три кекса, однако количество ингредиентов в рецепте рассчитано только на один. Поскольку в этом рецепте рекомендуется взять  $\frac{3}{4}$  чашки молока, вы не сразу сообразите, что для трех кексов вам потребуется  $2\frac{1}{4}$  чашки. При этом купить именно  $2\frac{1}{4}$  чашки далеко не так просто, как упаковку в полкварты\*\*\*. Однако полкварты — это чуть меньше, чем  $2\frac{1}{4}$  чашки, так что в конце концов вы, скорее всего, просто купите две пинты\*\*\*. В результате у вас окажется молока на 14 унций\*\*\* больше, чем нужно. Но каких унций — весовых или объемных? И вот так всегда.

Международная система отличается от английской двумя особенностями, которые делают ее намного удобнее. В системе СИ:

1. Разные единицы измерения одной и той же физической величины соотносятся как степени числа 10.
2. Большинство единиц измерения являются производными трех основных единиц — метра, килограмма и секунды.

Рассмотрим сначала первую особенность: разные единицы измерения одной и той же физической величины соотносятся как степени числа 10. То есть при измерении объема 1000 мл равны 1 л, а 1000 л — 1 кубическому метру (1 м<sup>3</sup>). При измерении массы 1000 г равны 1 кг, а 1000 кг — 1 тонне. Благодаря таким соотношениям для изменения рецептуры кекса в СИ надо всего лишь умножить несколько чисел. Не надо больше гадать, как перевести пинты в кварты, чайные ложки в столовые или унции в фунты. Если вы хотите приготовить три порции чего-либо, а рецепт рассчитан только на одну, и в этом рецепте требуется 500 мл сахара, надо просто умножить это количество на 3, и у вас получится 1500 мл. Поскольку 1000 мл = 1 л, вам понадобится 1,5 л сахара. Перевести миллилитры в литры очень легко — надо умножить значение миллилитров на 0,001 (именно столько литров в миллилитре). Коэффициенты пересчета единиц измерений приведены в Приложении В.

Многим американцам система СИ кажется чем-то непостижимым, хотя некоторые основные единицы этой системы потихоньку проникают в наши продуктовые магазины и на автострады. И несмотря на то что СИ действительно гораздо

\* Чашка (cup) — “потребительская” мера объема жидкости, используемая в кулинарии в США и ряде других стран. В США в настоящее время равна 240 мл. — Здесь и далее прим. науч. ред.

\*\* Кварта (quart) — единица объема, в США составляет 0,946 л (для жидкостей) или 1,101 л (для сыпучих тел).

\*\*\* Пинта (pint) — единица объема, в США составляет 0,473 л (для жидкостей) и 0,55 л (для сыпучих тел).

\*\*\*\* Унция (ounce) — единица веса (28,3 г). Кроме того, имеется еще несколько (не менее шести) разновидностей этой единицы, в том числе объемная унция (fluid ounce), которая в США равна 1/16 пинты (29,57 мл).



разумнее устроена, чем традиционная английская система, внедрить в обиход некоторые единицы СИ не так-то просто. Многие ли из американцев меряют свой рост в метрах (а не в футах и дюймах), а вес в килограммах (а не в фунтах)? Будут ли у вас проблемы, если вы обгоните полицейскую машину на скорости 200 километров в час? (Еще бы их не было: ведь 200 км/ч — это примерно 125 миль в час!) Вообще-то в системе СИ часы не приняты — время тут измеряется в секундах, — однако большие промежутки времени все же принято измерять в часах. Следовательно, километр в час — это наполовину единица СИ (в том, что касается километров), а наполовину (в том, что касается часов) внесистемная единица.

Вторая особенность Международной системы — это малое число основных единиц. До сих пор мы имели дело с принятыми в СИ единицами измерения массы (килограмм, сокращенно кг), расстояния (метр, или м) и времени (секунда, или с). Один килограмм — это примерно масса одного литра воды, один метр примерно равен длине большого шага, за одну секунду можно успеть произнести «один банан». Из этих трех основных единиц можно вывести несколько других, например единицу измерения скорости в системе СИ (метр в секунду, или м/с) и ускорения (метр в секунду в квадрате, м/с<sup>2</sup>). Один метр в секунду — комфортная скорость ходьбы, один метр в секунду в квадрате — это ускорение только что тронувшегося с места лифта. Знание, что многие единицы измерения могут быть выведены из других, более простых, существенно облегчает пользование Международной системой единиц; английская система устроена далеко не так разумно.

Единица измерения силы в СИ также вытекает из основных единиц измерения массы, расстояния и времени. Если мы возьмем тело массой 1 кг и зададим вопрос, какую силу надо приложить, чтобы придать ему ускорение 1 м/с<sup>2</sup>, мы легко рассчитаем нужное значение. Раз 1 кг — это единица измерения массы в СИ, а 1 м/с<sup>2</sup> — единица измерения ускорения, логично, чтобы сила, вызывающая это ускорение, равнялась единице измерения силы в той же системе, а именно 1 кг·м/с<sup>2</sup>. Эта составная единица измерения, хоть она и выглядит громоздко, настолько важна, что ей присвоено собственное название, ньютон (Н), — радуется в честь сэра Исаака, автора второго закона механики, который связывает массу, расстояние и время в единице измерения силы. Один ньютон — это примерно вес 18 американских монет достоинством в четверть доллара; если вы неподвижно держите на ладони 18 четвертаков, вы ощущаете действие силы, направленной вниз и приблизительно равной 1 Н\*.

Поскольку окончательный переход на Международную систему может завершиться лишь через несколько поколений, в таблице на этой странице приведены соотношения разных систем. Акцент делается на единицах СИ, но английские и внесистемные единицы иногда позволяют лучше представить себе ту или иную физическую величину. Если мы услышим, что поезд-экспресс идет со скоростью 67 м/с, то большинству из нас это мало что скажет, однако 150 миль в час (240 км/ч) вызывают вполне понятное уважение.

\* Для сравнения: российская пятирублевая монета весит 6,5 г, так что 1 Н — это чуть меньше веса 16 таких монет.

Величина	Единицы СИ	Английские единицы	СИ > английские единицы	Английские единицы > СИ
Радиус-вектор (расстояние)	метр (м)	фут (ft)	1 м = 3,3808 ft	1 фут = 0,30480 м
Скорость	метр в секунду (м/с)	фут в секунду (ft/s)	1 м/с = 3,28008 ft/s	1ft/s = 0,30480 м/с
Ускорение	метр в секунду <sup>2</sup> (м/с <sup>2</sup> )	фут в секунду <sup>2</sup> (ft/s <sup>2</sup> )	1 м/с <sup>2</sup> = 3,28008 ft/s <sup>2</sup>	1ft/s <sup>2</sup> = 0,30480 м/с <sup>2</sup>
Сила	ньютон (Н)	фунт-сила (lbf)	1Н = 0,22481 lbf	1 lbf = 4,4482 Н
Масса	килограмм (кг)	фунт (lbm)	1 кг = 2,2046 lbm	1 lbm = 0,45359 кг

В английской системе и для измерения силы (в том числе веса), и для измерения массы употребляются единицы, которые называются фунт (*pound*, lb). Во избежание путаницы в США применяется несистемная единица, которая называется фунт-сила (*force-pound*, lbs), а когда речь идет о массе, употребляется фунт массы (lbm).



## 1.2 Падение мяча

Всем нам случалось бросать мячик и наблюдать за тем, как он описывает в воздухе плавную дугу. Это предельно простой вид движения, и для его описания достаточно всего нескольких фундаментальных законов физики. Кое-какие из них мы уже рассмотрели в предыдущем разделе, а теперь займемся первой важнейшей силой — силой земного притяжения. Говорят, Ньютон начал свои изыскания, увидев, как яблоко падает с яблони. Вот и мы начнем с изучения силы земного притяжения (силы тяготения) и ее влияния на движение на примере падающих тел.

### Вес и гравитация

Как и все вокруг нас, мяч имеет вес. Скажем, мячик для гольфа весит примерно  $0,45 \text{ Н}$ . А что такое вес? Очевидно, это сила, поскольку ньютон (Н) — это единица измерения силы. Но для того, чтобы понять смысл веса — и, главное, откуда берется вес, — надо знать, что такое гравитация.

Гравитация — это физическое явление, которое порождает силы притяжения между любыми двумя телами во Вселенной. Однако в обычной жизни лишь одно тело — наша планета Земля — достаточно массивно и находится достаточно близко к нам, чтобы оказывать на нас существенное гравитационное воздействие. Притяжение слабеет по мере увеличения расстояния, а Луна и Солнце настолько далеки от нас, что притяжение к ним мы замечаем лишь по таким не слишком значительным для нас самим явлениям, как морские приливы и отливы.

Из-за притяжения Земли на все тела, находящиеся вблизи ее поверхности, действует направленная вниз сила. Тело притягивается точно по направлению к центру земного шара с силой, которую мы называем весом тела (рис. 1.2.1). Примечательно, что вес прямо пропорционален массе тела — если масса одного мяча вдвое больше массы другого, его вес также будет вдвое больше. Взаимосвязь веса и массы неочевидна, ведь это абсолютно разные свойства; вес говорит об интенсивности воздействия притяжения на мяч, а масса — о том, насколько трудно придать мячу ускорение. Из-за этой взаимосвязи массы и ускорения тяжелый мяч труднее сдвинуть с места.

Вес тела пропорционален также силе земного притяжения в данной точке, а мерой этой силы служит направленный вниз вектор, называемый ускорением свободного падения — довольно странное название, и мы коротко обсудим его. У поверхности Земли ускорение свободного падения примерно равно  $9,8 \text{ Н/кг}$ . Эта величина означает, что тело массой  $1 \text{ кг}$  имеет вес  $9,8 \text{ Н}$ , а тело массой  $1 \text{ фунт}$  имеет вес  $1 \text{ фунт-сила}$ .



Рис. 1.2.1. Из-за притяжения Земли на мяч действует направленная вниз сила, и эту силу мы называем весом мяча. Именно вес заставляет мяч падать с ускорением, направленным вниз.

В общем виде вес равен произведению его массы на ускорение свободного падения, или

$$\text{вес} = \text{масса} \times \text{ускорение свободного падения} \quad (1.2.1).$$

Но что это за ускорение свободного падения? О каком ускорении речь? Чтобы ответить на этот вопрос, давайте посмотрим, что происходит с мячом, когда вы его бросаете.

Если на мяч действует единственная сила — его вес, он приобретает ускорение, направленное вниз, иначе говоря, падает. Хотя при движении в атмосфере Земли мяч испытывает еще и сопротивление воздуха, в данном случае мы не будем учитывать эти силы. Если мяч тугой, а его скорость невелика, то влияние сопротивления воздуха пренебрежимо мало, и, сделав такое допущение, мы не слишком погрешим против истины, зато сможем сосредоточить все внимание на влиянии земного притяжения.

Насколько велико ускорение падающего мяча? Согласно формуле 1.1.1 ускорение мяча равно действующей на него силе, деленной на его массу. Но раз мяч падает, на него действует только его собственный вес. Согласно уравнению 1.2.1 эта сила (вес) равна массе мяча, умноженной на ускорение свободного падения. После несложных преобразований получаем:

$$\begin{aligned} \text{ускорение падающего мяча} &= \text{вес мяча} / \text{масса мяча} = \\ &= \text{масса мяча} \times \text{ускорение свободного падения} / \text{масса мяча} = \\ &= \text{ускорение свободного падения}. \end{aligned}$$

Как видно, ускорение падающего мяча равно ускорению, которое вызывается притяжением Земли. Поэтому ускорение, вызванное земным притяжением, по сути, есть просто ускорение — ускорение свободно падающего тела. Более того, единицу измерения ускорения, вызванного притяжением Земли, легко вывести, если преобразовать размерность ускорения, связывающую вес и массу (9,8 Н/кг), в размерность ускорения свободного падения (9,8 м/с<sup>2</sup>).

Таким образом, мяч, падающий вблизи поверхности Земли, независимо от массы развивает ускорение, направленное вниз и равное 9,8 м/с<sup>2</sup>. Это ускорение значительно больше, чем ускорение лифта, который только что тронулся и начал спуск. Если вы уроните мяч, он будет падать, очень быстро набирая скорость, направленную вниз.

Поскольку у поверхности Земли все падающие тела ускоряют свое движение в одинаковой степени, бильярдный шар и шар для боулинга, одновременно упав с одной и той же высоты, достигнут пола также одновременно (см. ❶ и не забудьте, что сопротивлением воздуха мы пренебрегаем). Шар для боулинга весит больше бильярдного шара, но и масса у него больше, поэтому, хотя на шар для боулинга действует более значительная направленная вниз сила, его большая масса означает, что направленное вниз ускорение равно ускорению относительно легкого бильярдного шара, обладающего меньшей массой.

## Скорость падающего мяча

Теперь мы готовы к изучению движения падающего мяча вблизи поверхности Земли. На падающий мяч действует только сила земного притяжения, а она, как мы видели, заставляет любое тело падать с одинаковым, направленным вниз ускорением. Но обычно нас интересует не ускорение падающего тела, а его координаты и скорость.

Где окажется тело через 3 секунды и какова будет его скорость? Собираясь с духом перед прыжком в воду с вышки, вы наверняка хотите знать, долго ли вам лететь до воды и с какой скоростью вы войдете в нее.

Чтобы ответить на эти вопросы, сначала посмотрим, как связаны скорость мяча и время, в течение которого вы наблюдали за его падением. Для этого надо знать начальную скорость мяча, то есть ее величину и направление в тот момент, когда вы начали за ним наблюдать. Если вы уронили мяч, находившийся до этого в состоянии покоя, его начальная скорость была равна нулю.

❶ Все падающие тела ускоряются одинаково — это явление нам хорошо знакомо, хотя и кажется непонятным. Если вы бросите горсть монет или камешков, то все эти предметы полетят рядом друг с другом с одной и той же скоростью и достигнут земли одновременно. При условии, что сопротивление воздуха незначительно, предметы, брошенные вместе, и упадут вместе.

Тогда скорость мяча в каждый данный момент можно определить, используя понятия начальной скорости, ускорения и времени, прошедшего с того момента, как вы начали за ним наблюдать. Поскольку при постоянном ускорении скорость мяча меняется одинаково за каждую секунду, его скорость в данный момент времени отличается от начальной на произведение ускорения и времени наблюдения:

$$\text{скорость в данный момент времени} = \text{начальная скорость} + \text{ускорение} \times \text{время} \quad (1.2.2).$$

Начальная скорость мяча, который упал из состояния покоя, равна нулю, ускорение его направлено вниз и равно  $9,8 \text{ м/с}^2$ , а время наблюдения — это просто время, которое прошло с начала падения мяча (рис. 1.2.2). Спустя секунду мяч имеет скорость  $9,8 \text{ м/с}$ . Спустя 2 секунды эта скорость равна  $19,6 \text{ м/с}$ , спустя 3 секунды —  $29,4 \text{ м/с}$  и так далее. Так как мяч падает строго по вертикали, то перед значением ускорения мы ставим символ “-”, чтобы обозначить направление. Условимся, что знак минус подразумевает движение вниз.

Радиус-вектор	Время падения	Скорость	Ускорение
0 м	0с	0 м/с	$\downarrow -9,8 \text{ м/с}^2$
-4,9 м	1с	$\downarrow -9,8 \text{ м/с}$	$\downarrow -9,8 \text{ м/с}^2$
-19,6 м	2с	$\downarrow -19,6 \text{ м/с}$	$\downarrow -9,8 \text{ м/с}^2$
-44,1 м	3с	$\downarrow -29,4 \text{ м/с}$	$\downarrow -9,8 \text{ м/с}^2$

Рис. 1.2.2. Мяч покоился у вас в руке и начал падать в тот момент, как вы его отпустили. Под действием собственного веса он движется с ускорением, направленным вниз. Через 1 секунду он пролетит 4,9 м, а его направленная вниз скорость будет равна  $9,8 \text{ м/с}$ . Через 2 секунды мяч пролетит 19,6 м и будет иметь направленную вниз скорость  $19,6 \text{ м/с}$  и так далее. По мере того как мяч падает с ускорением, направленным вниз, его скорость, также направленная вниз, постоянно увеличивается. Отрицательные значения радиус-вектора и скорости указывают на то, что мяч движется вниз вследствие отрицательного (направленного вниз) ускорения.

## Радиус-вектор (координаты) падающего мяча

Скорость мяча по мере его падения возрастает, но как определить, где именно он находится в каждый момент времени? Чтобы ответить на этот вопрос, надо знать начальный радиус-вектор (начальные координаты) мяча, то есть где он был, когда вы начали наблюдать за его падением. Если вы уронили мяч, который был в состоянии покоя, его исходное положение — у вас на ладони, и эту точку можно считать началом отсчета (радиус-вектор равен 0).

Тогда радиус-вектор мяча можно выразить через его начальный радиус-вектор, начальную скорость, ускорение и время, прошедшее с момента начала наблюдения. Но из-за того, что вектор скорости мяча меняется, нельзя просто умножить его на время падения и подсчитать, насколько радиус-вектор в данный момент времени отличается от исходного. Необходимо применить понятие средней скорости за тот промежуток времени, в течение которого вы наблюдаете за мячом. С начала падения до данного момента времени скорость мяча менялась от начального значения до текущего постоянно и равномерно, поэтому средняя скорость равна той, которой мяч достиг на полпути между начальной и конечной скоростями.

$$\text{средняя скорость} = \text{начальная скорость} + 1/2 \times \text{ускорение} \times \text{время}.$$

Радиус-вектор мяча в данный момент времени отличается от начального на произведение средней скорости и времени наблюдения:

$$\begin{aligned} \text{положение в данный момент времени} = & \text{начальное положение} + \\ & + \text{начальная скорость} \times \text{время} + 1/2 \times \text{ускорение} \times \text{время}^2 \end{aligned} \quad (1.2.3).$$

Если мяч падает из состояния покоя, начальная скорость равна нулю, ускорение направлено вниз и равно  $9,8 \text{ м/с}^2$ , а время наблюдения — это время, прошедшее с момента начала падения мяча (рис. 1.2.2). За 1 секунду мяч пролетит 4,9 м. За 2 секунды мяч пролетит вниз 19,6 м. За 3 секунды — 44,1 м и так далее.

В уравнения 1.2.2 и 1.2.3 входят ускорение (как мера темпа изменения вектора скорости) и вектор скорости (как мера темпа изменения радиус-вектора). Ускорение падающего мяча постоянно, оба уравнения могут быть выведены с помощью элементарной алгебры. Но в более сложных случаях, когда ускорение меняется со временем, для определения координат и скорости требуется применить дифференциальное исчисление. Дифференциальное исчисление — это особый раздел математики, и придумал его Ньютон специально для решения задач такого рода.

До сих пор мы обсуждали падение мяча, но могли бы взять вместо него и другие предметы. Всем телам — тяжелым и легким, большим и маленьким — требуется одинаковое время на то, чтобы долететь до Земли с одной и той же высоты, при условии, что они достаточно твердые и могут преодолеть сопротивление воздуха. В безвоздушном пространстве это утверждение истинно для любых тел; перо и свинцовый брусок, сброшенные одновременно, упадут одновременно.

Теперь, зная, что такое ускорение свободного падения, мы можем понять, почему мяч, слетевший с высокой лестницы, опаснее мяча, упавшего с низкой табуретки. Чем более длинный путь проделывает мяч, тем дольше он будет лететь до земли и тем больше времени будет иметь на движение с ускорением. За время долгого падения с лестницы мяч разовьет большую скорость, направленную вниз, и его нелегко будет остановить. Если вы попытаетесь поймать его, вам придется приложить большую, направленную вверх силу, чтобы придать мячу направленное вверх ускорение и заставить его резко остановиться. Приложение такой большой силы к мячу может причинить вам боль. Влияние сопротивления воздуха на процесс падения описано в примечании 2.

Все вышеописанное касается и вас, если падающий объект — ваше собственное тело. Спрыгнув с высокой лестницы, вы спустя какое-то время достигнете пола. К моменту приземления вы успеете развить значительную скорость, направленную вниз. Пол сообщит вам ускорение, направленное вверх, произведет на вас с большой силой довольно неприятное воздействие, и вы остановитесь. Можно вспомнить и более интересные (и вместе с тем менее травмоопасные) случаи продолжительного падения 3.

## Как движется брошенный мяч; баллистическое движение

Под действием лишь собственного веса тело просто падает. До сих пор мы изучали это явление только на примере мяча, который роняют вниз из состояния покоя. Но и подброшенный вверх мяч тоже падает; оторвавшись от вашей руки, он испытывает действие единственной силы — направленной вниз силы тяжести, в результате чего и летит вниз. Это может показаться странным, но даже если сначала мяч движется вверх, его ускорение направлено вниз и равно  $9,8 \text{ м/с}^2$ . В результате скорость подброшенного вверх мяча уменьшается, он прекращает подниматься, вектор скорости будет направлен уже вниз, и наконец мяч оказывается на земле.

Уравнение 1.2.2 описывает зависимость скорости мяча от времени падения, но теперь вектор начальной скорости отличен от нуля и направлен вверх. Подброшенный вверх мяч в момент отрыва от ладони имеет довольно большую, направленную вверх скорость (рис. 1.2.3). Как только вы подкинете мяч, он начнет движение с ускорением, направленным вниз. При начальной скорости мяча  $29,4 \text{ м/с}$  через 1 секунду направленная вверх скорость будет  $19,6 \text{ м/с}$ . Еще через секунду модуль вектора скорости, направленного вверх, составит всего лишь  $9,8 \text{ м/с}$ . Спустя третью секунду мяч на мгновение остановится, и вектор скорости будет равен 0. Затем мяч начнет падать с максимальной высоты так, как если бы его уронили из состояния покоя.

Движение мяча до и после достижения верхней точки симметрично. Поначалу он быстро летит вверх, поскольку ему сообщили большую, направленную вверх скорость. По мере уменьшения скорости мяч летит все медленнее и медлен-

2 Когда тело падает вниз, то направленная вверх сила сопротивления воздуха противодействует направленному вниз весу тела и уменьшает его ускорение, также направленное вниз. Поскольку с увеличением скорости возрастает и сопротивление воздуха, тело рано или поздно прекратит ускоряться и будет падать равномерно с конечной скоростью. Если уронить с небоскреба монетку в один пенс, то в отсутствие сопротивления воздуха ее скорость достигла бы  $340 \text{ км/ч}$ , однако на самом деле монетка полетит вниз с конечной скоростью меньше  $80 \text{ км/ч}$ , и вы вполне сможете ее поймать. Однако берегитесь, если падает шариковая ручка!

3 В 1782 году бристольский слесарь Уильям Уоттс запатентовал способ литья идеально круглых и бесшовных шариков охотничьей дробы. Он предложил проливать расплавленный свинец через решето, подвешенное на большой высоте над емкостью с водой. Падая, капли свинца остывали в воздухе и, прежде чем коснуться поверхности воды, превращались в безупречно ровные шарики. Дробилейные башни скоро появились по всей Европе, а потом и в Америке. В наши дни вредную для окружающей среды свинцовую дробь практически полностью вытеснила стальная, которую изготавливают методом литья в форме: расплавленному железу нужно больше времени, чтобы остыть и затвердеть, а значит, дробилейные башни пришлось бы строить абсурдно высокими.

0 м	0с	0 м/с	↓ -9,8 м/с <sup>2</sup>
-4,9 м	1с	↑ 9,8 м/с	↓ -9,8 м/с <sup>2</sup>
-19,6 м	2с	↑ 19,6 м/с	↓ -9,8 м/с <sup>2</sup>
-44,1 м	3с	↑ 29,4 м/с	↓ -9,8 м/с <sup>2</sup>
Радиус-вектор	Время падения	Скорость	Ускорение

**Рис. 1.2.3.** В момент броска мяча вверх он начинает движение с ускорением  $9,8 \text{ м/с}^2$ , направленным вниз. Мяч летит вверх, но его скорость равномерно уменьшается до тех пор, пока он на мгновение не остановится. Затем мяч начинает падать с равномерно нарастающей скоростью, направленной вниз. В нашем примере мяч поднимается в течение 3 секунд, затем останавливается. После этого он 3 секунды падает, пока снова не достигнет вашей ладони в своем весьма симметричном полете.

нее до полной остановки. Затем начинает снижаться — сначала медленно, потом все быстрее и быстрее, с постоянным, направленным вниз ускорением. Время, за которое мяч достигнет максимальной высоты после броска вверх, равно времени его падения с пика высоты до уровня вашей ладони. Уравнение 1.2.3 показывает зависимость радиус-вектора (координат) мяча от времени падения при условии, что в момент отрыва от ладони вектор начальной скорости мяча направлен вверх.

Чем больше начальная направленная вверх скорость, тем дольше и выше поднимется мяч, прежде чем его скорость уменьшится до нуля. Затем мяч падает, и на это уходит ровно столько же времени, как и на подъем. Чем выше подлетит мяч, прежде чем начать падение, тем больше времени ему потребуется на то, чтобы вернуться в начальную точку, и тем быстрее он будет двигаться перед падением. Вот почему можно получить сильный удар по ладони, если поймать мяч, падающий с большой высоты: к моменту соприкосновения с вашей рукой мяч летит очень, очень быстро, и чтобы резко остановить его, необходимо приложить значительную силу.

А что, если бросить мяч не строго вверх по вертикали, а под некоторым углом? Мяч и в этом случае достигнет определенной высоты и начнет падать; но пока он будет подниматься и опускаться, он еще и улетит от вас в сторону и коснется земли на некотором расстоянии от вас. В какой степени это перемещение в горизонтальном направлении осложняет общую картину полета мяча?

Ответ: не слишком осложняет. Одно из замечательных упрощений, принятых в физике, заключается в том, что, как правило, перемещение тела по вертикали и горизонтали можно рассматривать независимо одно от другого. При таком подходе векторные величины — ускорение, скорость и положение, описываемое радиусом-вектором, — раскладываются на составляющие, проекции вектора на каждую ось координат (рис. 1.2.4). Например, вертикальная составляющая положения тела — это высота, на которой оно находится.

Если известно лишь, на какой высоте находится мяч, то нельзя точно определить его положение — надо знать, находится он справа или слева от вас, впереди или сзади. Действительно, вы можете однозначно задать радиус-вектор (как и любую другую векторную величину) тремя составляющими по трем взаимно перпендикулярным (то есть расположенным под прямыми углами друг к другу) осям координат. Это означает, что радиус-вектор мяча можно задать, указав высоту, на которой находится мяч, расстояние по горизонтали влево или вправо от вас и расстояние по горизонтали перед вами или позади вас. Допустим, мяч находится на высоте 10 м, в 3 м слева от вас и в 2 м сзади от вас. Эти три расстояния точно указывают местоположение мяча.

Вплоть до нынешнего момента мы рассматривали только вертикальные составляющие радиус-вектора, скорости и ускорения мяча. А теперь мы хотим бросить мяч так, чтобы он летел и в горизонтальном направлении, поэтому нам придется учесть изменение горизонтальных составляющих каждого из этих векторов. Раз мы изучаем движение мяча, который бросили прямо перед собой и который летит только вперед, то его перемещениями вправо и влево можно пре-

Вертикальная составляющая вектора скорости



**Рис. 1.2.4.** Даже если вектор скорости мяча не направлен строго по вертикали или горизонтали, можно считать, что он имеет вертикальную и горизонтальную составляющие. Одна компонента суммарного вектора скорости отвечает за движение мяча вверх, а другая — за движение того же мяча в горизонтальном направлении.

небрежь; таким образом, мяч будет перемещаться в вертикальной плоскости, которая простирается прямо перед нами. В этом случае координатами мяча можно считать высоту его положения и расстояние от нас по горизонтали.

Поскольку ускорение мяча постоянно и не зависит от того, где именно находится мяч (при условии, что он находится вблизи земной поверхности), его перемещение в горизонтальном направлении не зависит от перемещения по вертикали. Как мяч движется в вертикальном направлении, мы уже знаем, а что можно сказать о движении по горизонтали? Видимо, чтобы описать горизонтальную часть перемещения мяча, нам понадобятся какие-то новые уравнения, описывающие зависимость изменения координат, скорости и ускорения от времени. К счастью, мы и здесь можем воспользоваться уравнениями 1.2.2 и 1.2.3.

Уравнения 1.2.2 и 1.2.3 были выведены для описания вертикального перемещения мяча, однако они применимы и в общем случае. Они связывают три вектора — радиус-вектор, скорость и постоянное ускорение. Эти равенства описывают изменение радиус-вектора и скорости во времени при движении тела с постоянным ускорением независимо от направления последнего.

Эти уравнения применимы и к составляющим радиус-вектора, скорости и ускорения. Если в уравнениях 1.2.2 и 1.2.3 для каждого вектора дополнительно уточнить, что подразумевается его вертикальная составляющая, они будут адекватно описывать перемещение тела по вертикали. То же самое можно проделать и для движения тела по горизонтали. Ранее, при изучении движения по вертикали, мы подразумевали в этих уравнениях вертикальные составляющие. Теперь нам надо рассмотреть перемещение мяча в горизонтальном направлении — давайте будем иметь в виду горизонтальные составляющие.

Как только мяч оторвется от вашей руки, его движение можно разложить на две части: движение по вертикали и движение по горизонтали (рис. 1.2.4). Одна часть вектора начальной скорости направлена вверх, и этот вертикальный вектор скорости определяет подъем и спуск мяча. Вторая часть вектора начальной скорости направлена горизонтально, в сторону броска и характеризует перемещение мяча в сторону.

Поскольку к летящему мячу приложена только сила тяжести, а ее действие направлено строго вниз, то ускорение не имеет горизонтальной составляющей. Стало быть, горизонтальная составляющая вектора скорости постоянна, и в горизонтальном направлении мяч движется равномерно на протяжении всего полета (рис. 1.2.5). Итак, высота подъема мяча и время его пребывания в воздухе, пока он не стукнется о землю, определяются вертикальной составляющей начальной скорости, а от горизонтальной составляющей зависит то, как быстро в течение этого времени мяч летит в сторону (рис. 1.2.6).

Непосредственно перед ударом о землю мяч еще сохраняет горизонтальную составляющую скорости, но вертикальная теперь направлена вниз. Полная скорость мяча складывается из этих двух составляющих. Мяч начинает движение со скоростью, направленной вверх и вперед, а заканчивает со скоростью, направленной вниз и вперед.

Для того чтобы мяч или пуля упали на землю как можно дальше от вас, надо удержать их в воздухе как можно дольше и одновременно сообщить им скорость с достаточно большой горизонтальной составляющей; иначе говоря, надо достичь правильного баланса вертикальной и горизонтальной составляющей вектора скорости (рис. 1.2.7). Путь мяча в воздухе (его траектория) определяется обеими этими составляющими. Если бросить мяч вертикально вверх, он может провести в воздухе достаточно длительное время, но при этом вообще не сместится по горизонтали — так что не забудьте надеть каску. Если метнуть его строго по горизонтали, горизонтальная составляющая вектора скорости будет велика, но мяч упадет на землю почти сразу.

Если не учитывать сопротивление воздуха и высоту положения вашей руки относительно конечного уровня падения мяча, самое разумное — метнуть мяч под углом  $45^\circ$  к горизонтальной оси. При такой ориентации составляющая начальной скорости, направленная вверх, будет равна составляющей, направленной вдоль поля. Мяч будет лететь достаточно долго и использует это время оптимальным образом для своего перемещения по горизонтали. При других углах столь же эффективно использовать для броска начальную скорость не удастся. Как разло-

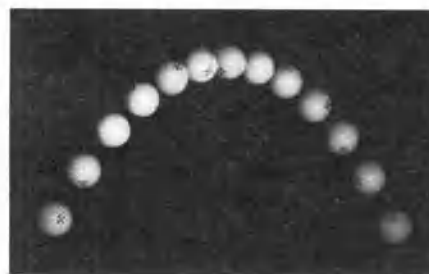


Рис. 1.2.5. После броска мячик для гольфа равномерно перемещается вправо вдоль поверхности поля, потому что сила тяжести влияет только на вертикальную составляющую вектора скорости.



Рис. 1.2.6. Если бросить мяч вверх под углом, одно слагаемое вектора скорости будет направлено по вертикали, а другое — по горизонтали. Перемещения в вертикальном и горизонтальном направлениях не зависят одно от другого. Мяч набирает высоту и опускается так же, как он делал это на рис. 1.2.2 и 1.2.3. Но вместе с тем мяч движется и вдоль поверхности поля. Поскольку ускорение не имеет горизонтальной составляющей (сила тяжести направлена строго вниз), горизонтальная составляющая скорости постоянна, что и показывает стрелка горизонтального вектора. В данном примере за каждую секунду мяч пролетает 10 м и в результате падает в 60 м от вас, продержавшись в воздухе 6 секунд.

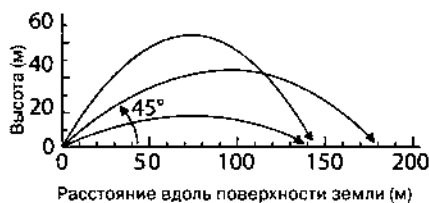


Рис. 1.2.7. Если вы хотите, чтобы мяч, благодаря большой начальной скорости, упал как можно дальше от места, где вы стоите, бросайте его под углом  $45^\circ$ . Бросок в таком направлении, среднем между горизонтальным и вертикальным, сообщает мячу начальную скорость, вертикальная и горизонтальная составляющие которой равны. При этом мяч останется в воздухе достаточно долго и за это время улетит далеко.

☛ Лучники и стрелки обычно целятся чуть выше центра мишени, потому что как только стрела или пуля выпущена, она тут же начинает падать, одновременно летя к цели. Чем больше расстояние до цели и время полета пули или стрелы, тем более заметен этот эффект. В принципе можно считать, что стрела (или пуля), выпущенная горизонтально, приземлится одновременно со стрелой (или пулей), просто упавшей вниз из состояния покоя. Инерционное движение метательного снаряда в горизонтальном направлении не влияет на скорость его падения по вертикали.

жить вектор скорости на горизонтальную и вертикальную составляющие, объясняется в Приложении А.

Точно так же можно рассмотреть движение двух бейсбольных мячей, один из которых просто падает с обрыва, а другой брошен в горизонтальном направлении с того же обрыва. Оторвавшись от ваших рук одновременно, мячи коснутся земли тоже одновременно. То, что начальная скорость мяча была направлена по горизонтали, не влияет на время его падения, потому что перемещения по вертикали и по горизонтали независимы. Само собой, брошенный вперед мяч упадет на землю на некотором отдалении от подножия горы, а тот, что вы просто уронили, приземлится точно под вашей рукой ☛.

## Масса или вес

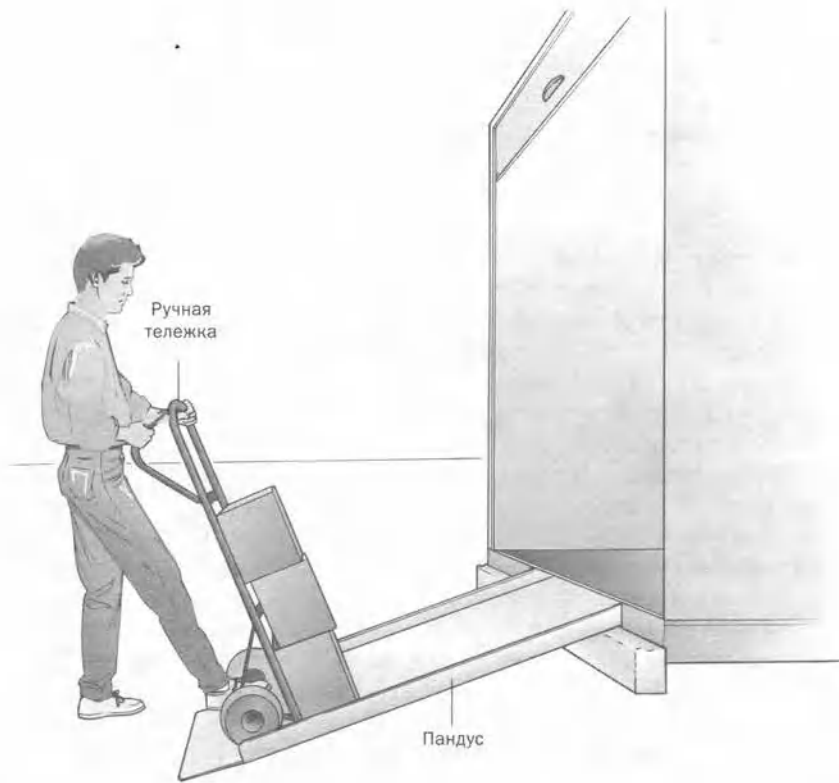
В продуктовых магазинах продают товары, количество которых после взвешивания на весах указано в единицах массы — граммах и килограммах, что может привести к выводу, будто вес и масса — это одно и то же. Ничего подобного. Вес говорит о силе воздействия на тело земного притяжения, а масса — о том, насколько трудно сообщить телу ускорение. Вес зависит от внешних факторов — как правило, от влияния Земли, — поэтому его нельзя считать исключительно свойством тела. Масса, напротив, — свойство, присущее самому телу, никак не связанное с окружающей средой. Чтобы придать ускорение килограммовой коробке шоколадных конфет на Луне, надо приложить столько же усилий, что и на Земле, хотя ее вес там будет намного меньше.

Чтобы понять, чем отличается масса от веса, полезно отправиться в магазин, где продаются велосипеды. Допустим, вы хотите понять, у какого велосипеда самая маленькая масса. Если вы намерены ездить только по ровной, гладкой дороге без подъемов и спусков и если вам придется часто тормозить и снова трогаться с места, важна именно масса. Массивный велосипед тяжело сдвинуть с места и тяжело остановить, поэтому неплохо было бы выбрать машину с малой массой. Чтобы оценить массу велосипеда, вовсе не обязательно его поднимать. Достаточно покатавать его взад-вперед по полу. Чем массивнее велосипед, тем тяжелее стронуть его с места, чтобы придать ему некое ускорение. Вы запросто определите велосипед с наименьшей массой: вам легче всего будет изменить направление и скорость его движения.

С другой стороны, для регулярных велосипедных прогулок в горах вам захочется иметь легкую машину — вы ведь не хотите тащить вверх по склону больше груза, чем это необходимо. Чтобы определить вес велосипеда, попробуйте приподнять его. Чтобы оторвать от пола тяжелый велосипед, необходимо приложить большую силу, направленную вверх.

Но столь дотошно различать массу и вес приходится далеко не всегда, и по весьма весомай причине: в данной точке пространства масса и вес прямо пропорциональны друг другу, а коэффициентом пропорциональности является ускорение свободного падения в данном месте. Благодаря этому соотношению можно оценить параметры велосипеда либо по массе (покатав его взад-вперед), либо по весу (приподняв его). Если вам покажется, что масса одного велосипеда вдвое больше массы другого, будьте уверены — и вес его также вдвое больше. Поэтому мы можем позволить себе некоторую небрежность со словами «масса» и «вес», словно это одно и то же. Главное — помнить, что они отличаются друг от друга по сути и ассоциируются с разными физическими понятиями.





## 1.3 Наклонные плоскости

В предыдущем разделе мы изучали поведение тела, на которое действует единственная сила — направленная вниз сила тяжести. Но что происходит, когда к телу одновременно приложены две силы или даже больше? Предположим, на полу лежит какой-то предмет. На него действуют сила тяжести (направлена вниз) и сила со стороны пола (направлена вверх). На ровном полу тело не имеет ускорения, а на наклонном — вроде пандуса — тело имеет ускорение, направленное вниз. В этом разделе мы рассмотрим движение тел по наклонной плоскости. Уклоны добавляют адреналина в такие виды спорта, как скейтбординг и горные лыжи, а пандусы и погрузочные трапы повсеместно используются для подъема и транспортировки тяжелых предметов.

### Рояль на тротуаре

Представьте себе, что у вас есть знакомая, талантливая пианистка, чье дарование публика еще не оценила сполна. Она только что сняла новую квартиру и просит вас помочь ей поднять с улицы в комнату кабинетный рояль, поскольку услуги профессиональных грузчиков (рис. 1.3.1) ей не по карману. Можно считать, что вам еще повезло — квартира вашей приятельницы находится всего лишь на втором этаже. Но все равно перед вами стоит непростая задача — как поднять наверх тяжелый рояль? И что еще важнее — как сделать так, чтобы во время транспортировки он не рухнул вниз?

Проблема в том, что вы не сможете одним махом забросить рояль на второй этаж. Конечно, можно разрубить инструмент на части и перенести их по очереди. Но тут есть одно маленькое «но» — доставку дров ваша знакомая не заказывала. Разумнее было бы придумать какой-то способ, который облегчил бы подъем рояля, и лучше всего тут воспользоваться таким немудреным приспособлением, как пандус.

Веками различные наклонные плоскости — насыпи, трапы и пандусы — помогали решать подобные задачи. Наклонные плоскости позволяют приложить очень большую направленную вверх силу, необходимую для подъема каменных блоков и других тяжестей, поэтому их использовали еще строители пирамид. Чтобы понять, каким образом на наклонной плоскости возникают нужные силы, давайте продолжим рассматривать пример с роялем. И начнем с силы, которая



Рис. 1.3.1. Поднять груз по наклонному пандусу было бы куда проще.

действует на рояль, когда он просто стоит на некой поверхности. Мы по-прежнему не будем учитывать трение и сопротивление воздуха, иначе беседа заведет нас слишком далеко. К тому же у рояля есть колесики, и трение можно считать пренебрежимо малым.

## Тротуар наносит ответный удар: третий закон Ньютона

---

Глядя на рояль, который стоит перед домом вашей подруги, вы вдруг замечаете нечто сенсационное: рояль не проваливается сквозь тротуар! Что это — вдруг исчезло земное притяжение? Вовсе нет: если вы начнете двигать рояль и ваша нога случайно попадет под колесико, вы получите до боли ясный ответ на этот вопрос. По-видимому, рояль по-прежнему сохраняет свой обычный вес. Однако что-то на поверхности тротуара не дает ему провалиться к центру Земли. Давайте проанализируем ситуацию подробнее.

Сперва отметим, что рояль, очевидно, сильно давит на тротуар. Именно по этой причине лучше не подставлять под него ноги. Однако сила, направленная вниз и действующая на тротуар, не объясняет, почему не падает рояль. Надо посмотреть, чем поверхность тротуара отвечает на давление со стороны рояля — оказывается, тротуар толкает рояль вверх! Вы заметите эту реакцию тротуара, если нагнетесь и надавите на него рукой — он будет твердо сопротивляться вашему движению. Эти две силы — направленная вниз, приложенная к тротуару со стороны руки, и направленная вверх, действующая на руку, — равны по величине и противоположны по направлению.

Не только тротуар и рука (или рояль) действуют друг на друга с противоположно направленными и равными по величине силами — это наблюдается всегда при взаимодействии двух тел. Если вы надавите на какой-нибудь предмет, он в ответ надавит на вас с той же силой, направленной в противоположную сторону. Это правило известно как третий закон Ньютона, последний из трех законов механики; обычно его формулируют так: для каждой силы существует равная по величине и противоположно направленная ответная сила.

---

### Третий закон Ньютона

Для каждой силы, с которой одно тело действует на другое, существует равная по модулю и противоположная по направлению сила, приложенная к первому телу со стороны второго.

Этот закон выполняется на удивление строго. Если вы надавите на любой объект, большой или малый, твердый или мягкий, неподвижный или мчащийся со скоростью ракеты, вы обязательно почувствуете ответное действие точно такой же, но противоположной силы, которая точно так же давит на вашу руку.

В нашем случае тротуар и рояль действуют друг на друга с равными по модулю и противоположными по направлению силами. Лишь одна из этой пары сил приложена к роялю — направленная вверх сила, действующая со стороны тротуара. Она-то и не дает роялю провалиться сквозь землю. Вот мы и разгадали загадку.

---

### Голос интуиции: действие и противодействие

Интуиция подсказывает, что, если нажать на тело, которое удаляется от вас, оно ответит более слабой силой, чем сила вашего давления. А если вы нажмете на тело, которое приближается к вам, сила его реакции будет больше силы вашего воздействия на него.

Физика утверждает, что, когда вы нажимаете на тело, оно в ответ нажимает на вашу руку с той же силой.

**Вывод:** Нажимать на тело, которое удаляется от вас, неудобно — естественно, вы нажимаете с меньшим усилием, чем могли бы. Небольшая сила, с которой удаляющееся тело давит на вашу руку, и в этом случае равна той небольшой силе, с которой вы нажимаете на него, но направлена в противоположную сторону. И наоборот — очень удобно с силой надавить на тело, которое движется к вам, поэтому вы нажимаете сильнее, чем собирались. И вновь большая сила, воздействие которой вы ощущаете, равна по модулю произведенной вами силе и противоположна ей по направлению.

---

## Как найти опору и приумножить силы

Мы выяснили, почему рояль не падает, но так пока и не знаем, какого рода сила действует на него со стороны тротуара и почему эта направленная вверх сила так хорошо уравнивает направленный вниз вес рояля.

Начнем с описания силы: поскольку два тела не могут одновременно находиться в одной и той же точке, при соприкосновении их поверхности всегда отталкиваются. Каждое из этих тел прилагает к другому силу, которая называется силой реакции опоры, и каждая из этих сил направлена по нормали (то есть перпендикулярно) от поверхности тела **1**. Тротуар горизонтален, поэтому сила реакции опоры, с которой он действует на рояль, направлена по вертикали, ровно вверх (рис. 1.3.2).

А как велика сила реакции опоры? Чтобы ответить на этот вопрос, предположим, что она достаточно велика и может придать роялю направленное вверх ускорение. Тогда рояль быстро отделится от тротуара, поверхности не будут соприкасаться и сила реакции опоры, действующая на рояль со стороны тротуара, моментально станет слабее. Теперь представим себе обратную ситуацию: сила реакции опоры, действующая на рояль со стороны тротуара, мала, и ускорение рояля направлено вниз. Рояль вдавливается в тротуар, поверхности прижимаются друг к другу все сильнее, и сила реакции опоры возрастает.

При таком сценарии направленная вверх сила, приложенная к роялю со стороны тротуара, регулируется сама собой до тех пор, пока направленный вниз вес рояля не уравнивается и рояль не лишится всякого ускорения, направленного вверх или вниз. А если вы захотите слегка отдохнуть и присядете на рояль, направленная вверх сила реакции опоры со стороны тротуара вновь моментально изменится, компенсируя ваш вес.

Вывод о том, что направленная вверх сила реакции опоры, приложенная к роялю, точно уравнивает направленный вниз вес рояля, можно сформулировать иначе: на рояль действует результирующая сила, равная нулю, то есть сумма всех приложенных к роялю сил равна нулю. На тела нередко действует несколько сил одновременно, и его ускорение определяется массой и результирующей силой — суммой всех сил. Если вы с вашей подругой толкаете рояль в одном направлении, производимые вами силы складываются и дополняют друг друга, поэтому ускорение рояля направлено в ту же сторону (рис. 1.3.3, а). Если вы толкаете рояль в противоположных направлениях, силы, приложенные против друг друга, хотя бы частично компенсируются (рис. 1.3.3, б).

А если вы толкаете рояль одновременно в разных направлениях под некоторым углом друг к другу, вектор результирующей силы ляжет где-то между ними. Например, вы толкаете рояль к востоку, а ваша подруга — к северу, тогда результирующая сила направлена на северо-восток, и рояль приобретает ускорение в

**1** Силы, перпендикулярные поверхности, называются нормальными, так как в математике прямая, ортогональная плоскости (то есть проходящая под прямым углом к плоскости), называется нормалью.



Рис. 1.3.2. Рояль стоит на тротуаре. Тротуар действует на него с направленной вверх силой реакции опоры, которая уравнивает направленный вниз вес рояля. Результирующая сила, приложенная к роялю, равна нулю, поэтому рояль не имеет ускорения.

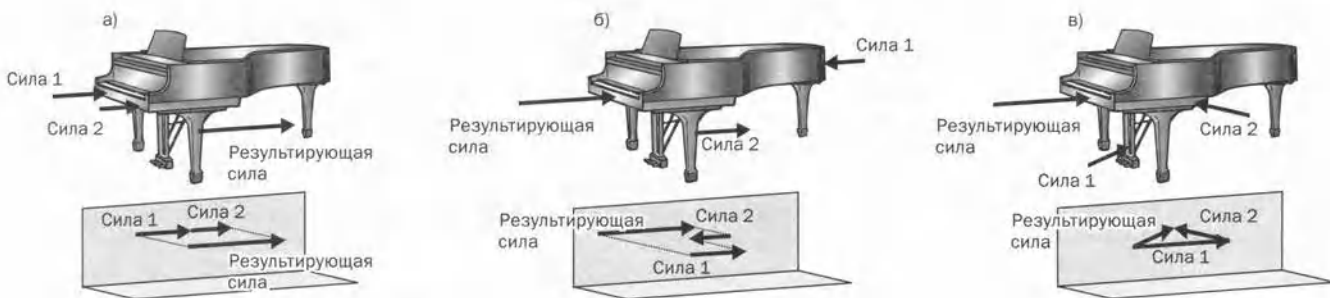


Рис. 1.3.3. Если на тело действует сразу несколько сил, оно реагирует на сумму этих сил. Эта сумма называется результирующей силой и характеризуется модулем и направлением. Здесь, как и далее в нашей книге, длина вектора силы отвечает ее величине (модулю). Можно сложить силы графически, начертив вектора последовательно, так чтобы конец предыдущего вектора совпадал с началом следующего. Суммарный вектор направлен от начала первого к концу (стрелке) последнего. Для удобства восприятия некоторые векторы сил смещены на рисунке — на результат сложения такой параллельный перенос не влияет.

том же направлении (рис. 1.3.3, в). Под каким именно углом будут направлены результирующая сила и связанное с ней ускорение рояля, зависит от того, с какой силой толкает рояль каждый из вас. Нам, в рамках нашей дискуссии, достаточно приблизительно оценить величину и направление результирующей силы, а это мы можем сделать, исходя из здравого смысла.

Помимо направления, между силой тяжести рояля и силой реакции опоры, действующей на него со стороны тротуара, есть одно важнейшее различие. Вес рояля распределен по всему инструменту, а сила реакции опоры (тротуара) приложена только к его колесикам. Даже если результирующая сила равна нулю, воздействие отдельных сил, приложенных в разных точках, может вызвать значительное напряжение. И если рояль сделан недостаточно прочным, ножки его во время движения могут треснуть.

---

### **Распространенное заблуждение: третий закон Ньютона и уравновешенные силы**

**Заблуждение:** Если вы нажимаете на предмет, а он в ответ нажимает на вас, то две равные и противоположно направленные силы каким-то образом полностью уравновешивают друг друга, и ни вы, ни предмет не должны испытывать какого-либо воздействия.

**Ответ:** Силы, упомянутые в третьем законе Ньютона, всегда приложены к разным телам. Вы действуете на предмет, а он действует на вас. Поскольку ускорение зависит от результирующей силы — суммы всех сил, приложенных к предмету, — на него влияет только сила вашего воздействия на предмет, а не сила его воздействия на вас. Если, кроме вас, его никто и ничто не толкает, он приобретает ускорение. А если вас никто и ничто не толкает, кроме этого предмета, вы тоже приобретаете ускорение!

---

## Что нужно роялю: энергия

---

Размышляя о том, как бы занести рояль в квартиру вашей знакомой, вы должны позаботиться о безопасности. Рояль на тротуаре — вовсе не то же самое, что рояль на наклонной доске на высоте второго этажа. Под которым из них вы предпочли бы оказаться? У поднятого на высоту рояля есть особенность, которой не имеет рояль на земле: это способность прийти в движение — и разбиться вдребезги, а заодно раздавить все, что окажется на его пути. Эта способность реализовать возможный сценарий называется энергией, а сам процесс реализации — совершением работы.

Энергия и работа — важные физические *величины*, и они поддаются измерению. Так, энергию поднятого рояля и работу, которую он мог бы совершить при падении, можно измерить. Как вы догадываетесь, в физике и в обыденной жизни под работой и энергией понимаются разные вещи. Энергия в физике не имеет отношения к восторженному детскому визгу в парке аттракционов или к содержимому большой кружки крепкого кофе — вовсе нет, это всего лишь способность совершать работу. И работа в физике — это не отсиживание часов в офисе и не вскапывание грядок, а процесс переноса энергии.

Энергия переносится, а работа совершает этот перенос. Самое важное свойство энергии — то, что она сохраняется. Сохраняющейся физики называют величину, которая не может ни возникнуть ниоткуда, ни вдруг исчезнуть, но может быть передана от одной системы к другой и (как, в частности, энергия) перейти из одной формы в другую. В физике сохраняющиеся величины — это нечто особенное, их не так уж много. Если тело имеет энергию, оно не может просто так ее потерять, а может только передать ее другому телу, и эта передача осуществляется в процессе совершения над этим телом работы.

Зависимость между энергией и работой такая же, как между деньгами и тратой денег; деньги — это нечто, что передается из рук в руки, а трата денег — способ их передачи. Разумные, законопослушные граждане не производят и не уничтожают купюры, а передают их друг другу, то есть тратят. Самое приятное свойство денег — это возможность их потратить, а самое интересное свойство энергии — это возможность совершить за счет нее работу. Можно считать, что

деньги — это показатель нашей способности их тратить, а энергия — это показатель способности совершать работу.

До сих пор мы ходили по кругу: работа — это перенос энергии, а энергия — показатель способности совершить работу. Но что значит совершить работу над телом? Вы совершаете работу над телом, когда прикладываете к нему силу, и оно перемещается в направлении действия этой силы. Когда вы бросаете мяч, сила вашего воздействия на него направлена вперед, и мяч перемещается вперед — вы совершаете работу над мячом; поднимая камень, вы тянете его вверх, и он перемещается вверх — вы совершаете работу над камнем. В обоих случаях вы, совершая над телом работу, передаете ему свою энергию.

Передачу энергии телу часто можно наблюдать воочию. Когда вы бросаете мячик, он набирает скорость, и его кинетическая энергия — энергия движения, которая дает мячу возможность совершить работу над другим телом, ударившись о него, — возрастает. Когда вы поднимаете камень, он оказывается дальше от земли, и возрастает его потенциальная энергия — энергия, обусловленная силой притяжения камня к земле и обеспечивающая ему возможность совершить работу над телом, на которое он упадет. В общем случае потенциальная энергия запасается в поле сил внутренних и внешних взаимодействий.

Вернемся к нашей проблеме; теперь нам ясно, что поднять рояль на второй этаж означает в значительной степени увеличить его гравитационную потенциальную энергию. Энергия — сохраняющаяся величина, поэтому дополнительную энергию надо откуда-то взять. И, как это ни грустно, взять ее придется у вас! Чтобы доставить рояль в квартиру, вам придется обеспечить ему необходимую потенциальную энергию, совершив эквивалентную работу. Мы увидим, что вы можете совершить эту работу, двумя способами: либо с огромным трудом затащить рояль по лестнице, либо — что намного проще — попытаться закатить его в окно второго этажа по наклонному пандусу.

## Поднимаем рояль — совершаем работу

Чтобы совершить работу над телом, надо толкать его, в то время как оно будет перемещаться в направлении толчка. Совершаемая работа равна произведению приложенной силы на расстояние, на которое переместится тело в направлении действия силы:

$$\text{работа} = \text{сила} \times \text{расстояние}$$

(1.3.1)

Если тело движется в том же направлении, в котором его толкают, рассчитать работу легко — достаточно просто умножить силу на пройденный телом путь. Но если направления силы и перемещения тела не совпадают, умножать силу надо на составляющую вектора перемещения тела по направлению силы (то есть проекцию вектора перемещения на линию направления силы).

Если угол между векторами силы и перемещения небольшой, то, как правило, можно не обращать внимания на такую погрешность. Но по мере увеличения угла совершаемая над телом работа уменьшается. Если тело движется перпендикулярно силе, работа, которую над ним совершают, равна нулю — в направлении приложенной к нему силы тело не перемещается вовсе  $\odot$ . А если угол больше  $90^\circ$ , тело движется в направлении, противоположном силе, и на самом деле получается, что вы совершаете над ним отрицательную работу!

Мы помним, что каждой силе соответствует равная и противоположно направленная сила, и можем теперь объяснить, почему сохраняется энергия: всякий раз, когда вы совершаете работу над телом, оно совершает ровно такую же отрицательную работу над вами! В конце концов, если вы толкаете тело и оно перемещается в направлении приложенной к нему силы, то и оно толкает вас, а вы перемещаетесь в направлении противодействующей силы. Вы совершаете положительную работу над телом, а оно совершает отрицательную работу над вами.

Например, если вы приподнимете рояль, чтобы проверить его вес, вам придется подтолкнуть его кверху, и он переместится вверх, то есть вы совершите работу. В то же время рояль давит на ваши руки, но они тем не менее продолжают перемещаться вверх, поэтому над вашими руками совершается отрицательная работа. Итак, энер-

$\odot$  Чтобы подсчитать, какую работу вы совершаете, передвигая банкетку для рояля, вы должны знать направление вашего усилия и расстояние, на которое в результате переместилась банкетка. На работу, которую вы совершаете над банкеткой, и, стало быть, на изменение ее энергии влияет только проекция (составляющая) перемещения банкетки на направление толчка. Если банкетка движется точно по направлению толчка, сделанную работу определяет пройденный ею путь. Если банкетка движется навстречу вашему толчку, значит, вы совершаете отрицательную работу. А если она двигается перпендикулярно линии толчка, значит, ее перемещение никак не сказывается на работе (то есть вы не совершаете никакой работы). Пример последней ситуации: вы просто несете банкетку в горизонтальном направлении с постоянной скоростью. Поскольку вы нажимаете на банкетку снизу вверх, чтобы компенсировать ее вес, направления ее перемещения и приложенной силы перпендикулярны. Следовательно, вы не совершаете работы над банкеткой, а ее энергия не меняется. Вам станет жарко, вы даже взмокнете от пота, но вся ваша энергия останется при вас и не будет передана банкетке посредством совершения над ней работы.

\* Термин, который здесь и далее использует автор, нельзя назвать вполне общепринятым. В русской физической терминологии обычно говорят о тепловой энергии или количестве тепла.

гия рояля возрастает ровно на ту же величину, на которую уменьшается ваша энергия, — абсолютно честный обмен! Энергию, которую вы сейчас потеряли, вы в свое время взяли из пищи, это разновидность химической энергии, а рояль приобретает в основном потенциальную энергию, обусловленную земным притяжением.

Поняв, что рояль слишком тяжелый и по лестнице его не поднять, вы снова опускаете его на тротуар, и процесс поворачивается вспять — теперь рояль передает вам свою энергию. Теперь он совершает работу над вами, а вы совершаете над ним точно такую же отрицательную работу. Рояль теряет гравитационную потенциальную энергию, а вы получаете тепловую энергию — энергию неупорядоченных процессов\*, о которой мы поговорим в разделе 2.2. В отличие от резиновой ленты ваше тело не способно накапливать совершенную над ним работу, поэтому оно попросту разогревается. Тем не менее всегда легче, если не вы совершаете работу, а кто-то совершает ее над вами. Вот почему опустить какой-либо предмет проще, чем поднять его.

И наконец, когда вы просто поддерживаете рояль на весу, пока ваша приятельница привинчивает отлетевшее колесико, ни вы, ни рояль работы не совершаете. Вы просто с помощью мышц перегоняете полученную с последним приемом пищи химическую потенциальную энергию в тепловую и разогреваетесь.

**Сохраняющаяся величина — энергия.**

**Способ передачи — совершение работы.**

**Энергия** — способность совершать работу. Энергия не имеет направления. Скрытая форма — потенциальная энергия.

**Кинетическая энергия** — энергия, обусловленная движением.

**Потенциальная энергия** — энергия, обусловленная внутренними и внешними взаимодействиями.

**Работа** — механическое средство передачи энергии; работа = сила × расстояние.

## Потенциальная энергия

Какую работу пришлось бы совершить, поднимая рояль вверх по лестнице? После небольшого толчка, необходимого для перемещения рояля вверх, придется поддерживать вес рояля в процессе его движения с постоянной скоростью от тротуара до второго этажа. Вам надо будет тащить рояль наверх с силой, равной его весу, поэтому совершенная вами работа будет равна произведению его веса на расстояние, на которое вы поднимете рояль.

При такой схеме подъема рояля его потенциальная энергия увеличивается на величину произведенной над ним работы. Если мы условимся, что на тротуаре потенциальная энергия рояля равна нулю, то потенциальная энергия поднимаемого рояля равна произведению его веса на расстояние по вертикали (высоту) от тротуара. Раз вес рояля равен его массе, умноженной на ускорение свободного падения, то его потенциальная энергия равна массе, умноженной на ускорение свободного падения и на высоту от тротуара.

Все это справедливо не только для роялей. Потенциальную энергию любого тела можно найти, умножив его массу на ускорение свободного падения и на высоту его положения относительно того уровня, на котором потенциальная энергия принята равной нулю:

$$\text{потенциальная энергия} = \text{масса} \times \text{ускорение свободного падения} \times \text{высота} \quad (1.3.2)$$

Конечно, если вес тела известен, надо подставить его вместо произведения массы на ускорение свободного падения.

А какова потенциальная энергия рояля, поднятого на второй этаж? Если его вес равен 2000 Н, а высота второго этажа относительно тротуара равна 5 м, вы совершите работу по подъему рояля, равную 10 000 Н·м, и потенциальная энергия рояля будет равна 10 000 Н·м. Н·м — это единица измерения энергии и работы в СИ (Международной системе единиц), настолько важная, что ей присвоили собственное название — джоуль (Дж). Итак, величина потенциальной энергии рояля в поле сил тяжести на втором этаже составит 10 000 Дж.



**Рис. 1.3.4.** Рояль скользит вниз по пандусу под действием силы тяжести. Его ускорение при движении по пандусу намного меньше того ускорения, с которым он падал бы свободно.

Кое-какие примеры из обиденной жизни могут дать представление о том, что такое один джоуль. Чтобы поднять литровую бутылку воды на 10 см вверх, необходимо совершить работу, примерно равную 1 Дж. Горящей лампочке мощностью 100 Вт каждую секунду требуется 100 Дж. Съев кусок вишневого пирога, вы получите 2 000 000 Дж. Когда вы едете на велосипеде или изо всех сил гребете веслами, вы тратите около 1000 Дж в секунду. Запас энергии обычной батарейки для фонарика — примерно 10 000 Дж.

Величина	Единицы СИ	Английские единицы	СИ > английские единицы	Английские единицы > единицы СИ
Энергия	джоуль (Дж) = ньютон-метр (Н·м)	Фут-фунт (ft·lbf)	1 Дж = 0,73757 ft·lbf	1 ft·lbf = 1,3558 Дж

## Подъем рояля по пандусу

К сожалению, вряд ли вы сможете затащить рояль по лестнице своими силами. Необходим пандус — чтобы удерживать рояль и чтобы облегчить подъем его на второй этаж.

Как и со стороны тротуара, так и со стороны пандуса на рояль действует сила реакции опоры, которая не дает роялю провалиться. Но пандус не горизонтален, поэтому сила реакции опоры не направлена по вертикали (**рис. 1.3.4**). Вес рояля по-прежнему направлен строго вниз, но из-за того, что сила реакции опоры не направлена вверх, эти силы не могут уравновесить друг друга. На рояль действует результирующая сила, отличная от нуля.

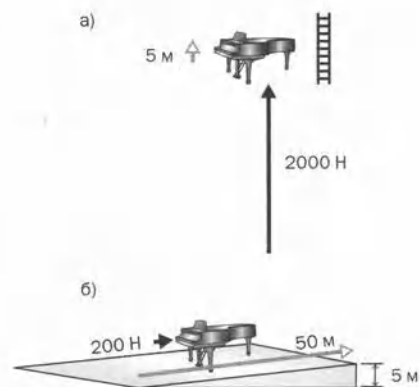
Эта результирующая сила не направлена ни внутрь пандуса, ни от него, в противном случае рояль приобрел бы ускорение, направленное внутрь пандуса или от него, — а значит, довольно быстро либо продавил бы поверхность пандуса, либо взлетел бы над ним. На самом деле результирующая сила направлена строго вдоль поверхности пандуса — по касательной к поверхности или параллельно ей. В данном случае она направлена к нижнему уровню пандуса, поэтому ускорение рояля направлено вниз вдоль пандуса!

Но из-за того, что эта результирующая сила намного меньше веса рояля, его направленное вниз и вдоль пандуса ускорение меньше того, с которым рояль падал бы свободно. Похожая ситуация возникает, когда человек едет с горы на велосипеде или чашка медленно скользит по наклоненному столу. Пока сила тяжести вносит достаточно большой вклад, велосипедист и чашка движутся вниз вдоль наклонной плоскости с ускорением, меньшим ускорения свободного падения.

Этим-то и замечателен пандус. Закатив рояль на пандус, вы обеспечиваете силу реакции опоры со стороны пандуса, почти компенсирующую его вес. Остается лишь небольшая результирующая сила, которая действует на рояль и заставляет его сползать вниз по пандусу. Теперь, если вы будете толкать рояль вверх по пандусу с силой, равной этой направленной вниз силе, результирующая сила уменьшится до нуля, и рояль остановится. А если толкнуть чуть сильнее, рояль сдвинется с ускорением вверх по пандусу!

Как влияет пандус на работу по перемещению рояля? Допустим, вы построили пандус от тротуара до балкона второго этажа; длина пандуса 50 м, он заканчивается на высоте 5 м над тротуаром (**рис. 1.3.5**). Следовательно, наклон пандуса таков, что прокатив по нему рояль на расстояние 50 м, вы поднимете его на высоту 5 м. Поскольку соотношение пройденного по пандусу расстояния и перепада высоты составляет 10:1, рояль весом 2000 Н можно толкать вверх с постоянной скоростью с силой, равной всего лишь 200 Н. Такая нагрузка, пожалуй, любому по плечу, и совершить необходимую работу становится вполне возможно. Чтобы добраться до квартиры, надо толкать рояль с силой 200 Н на протяжении 50 м, так что вы совершите работу 10 000 Дж.

Толкая рояль вверх по пандусу, вы при помощи законов физики справляетесь с задачей, которую иначе решить было бы почти невозможно. Но вы получаете бонус не задаром. Пандус гораздо длиннее лестницы, и, чтобы поднять рояль на второй этаж, вам приходится толкать его на большее расстояние. Безусловно, при этом вы должны приложить меньшую силу.



**Рис. 1.3.5.** Чтобы поднять рояль весом 2000 Н, можно толкать его вертикально вверх (а) или по пандусу (б). Чтобы скорость рояля оставалась постоянной, необходимо свести к нулю результирующую силу. Поднимая рояль по лестнице (а), вы должны приложить направленную вверх силу 2000 Н, которая компенсирует действие направленного вниз веса рояля. Если вы толкаете рояль вверх по пандусу (б), для того чтобы свести к нулю действующую на рояль результирующую силу, достаточно 200 Н.

Надо отметить, что в обоих случаях вы совершаете одинаковую работу 10 000 Дж. Когда вы поднимаете рояль по лестнице, сила, которую вы должны приложить, больше, зато мало расстояние, на которое перемещается рояль в направлении действующей силы. Когда вы толкаете рояль по пандусу, сила мала, а расстояние велико. Результат один и тот же — рояль оказывается на втором этаже и приобретает потенциальную энергию 10 000 Дж, а вы совершаете работу в количестве 10 000 Дж. В виде уравнений эти соотношения выглядят так:

$$\text{работа} = \text{большая сила} \times \text{малое расстояние} = \text{малая сила} \times \text{большое расстояние}.$$

В отсутствие трения работа по перемещению рояля на второй этаж не зависит от способа перемещения. Независимо от способа транспортировки рояля его потенциальная энергия возрастает до 10 000 Дж, поэтому вам приходится совершить над ним работу 10 000 Дж. Даже если вы разберете рояль на детали и занесете их на второй этаж по отдельности, а затем вновь соберете инструмент в гостиной, вы совершите работу по перемещению рояля вверх, равную 10 000 Дж.

Однако если у вас нет опыта сборки и настройки роялей, то, наверное, разумнее воспользоваться пандусом. Он позволяет одному человеку затащить в квартиру кабинетный рояль без лишних усилий. Пандус дает выигрыш в силе — так называется процесс перераспределения с помощью какого-нибудь механического устройства величин силы и расстояния, определяющих произведенную механическую работу. Двигая рояль по пандусу, вы прикладываете малую силу на большом расстоянии и делаете то, для чего в обычных условиях потребовалось бы приложить большую силу на малом расстоянии. Вы спросите, не совершает ли пандус работу над роялем? Нет, не совершает\*. Хотя со стороны пандуса на рояль действует сила реакции опоры и рояль перемещается по поверхности пандуса, эта сила и это перемещение рояля перпендикулярны друг другу. Пандус не совершает работы над роялем.

Выигрыш в силе имеет место во многих случаях, в том числе при движении тел по наклонной плоскости. Представьте себе, что вы взбираетесь на велосипеде в гору. Подъем на пологий холм требует гораздо меньшей направленной вверх силы, чем на крутой склон той же высоты. Поскольку силу, направленную вверх, в конечном итоге производите вы, когда крутите педали, взобраться на пологий склон гораздо легче, чем на крутой. Разумеется, вам придется проделать более долгий путь, чем короткий бросок, с помощью которого вы бы поднялись вверх в самом крутом месте, так что в обоих случаях вы совершаете одинаковую работу.

Различные варианты наклонных плоскостей можно увидеть во многих устройствах — с их помощью уменьшаются силы, необходимые для выполнения работ, выполнить которые другим способом было бы трудно. Кроме того, они меняют характер некоторых видов деятельности. Кататься на лыжах было бы далеко не так приятно, если бы перед вами были только горизонтальные поля и вертикальные обрывы. Выбирая более крутой или более пологий спуск, вы выбираете результирующую силу, которая действует в процессе катания. На пологом склоне сила мала и ускорение невелико; на более крутом большая сила вызывает большое ускорение.

И напоследок надо отметить вот что: вы в любом случае совершаете одинаковую работу, но вынуждены пойти на компромисс, а именно выбрать, что для вас важнее — большая сила или перемещение на большее расстояние. Производство этих двух величин — силы и перемещения — останется тем же.

## Спортивные тренажеры

Когда речь заходит о “работе” в спортзале, едва ли вы думаете о физике. Тем не менее во время тренировки вы главным образом совершаете физическую работу, то есть участвуете в процессе передачи энергии, и понимание этого процесса поможет вам использовать тренажеры более эффективно.

Поднимая и опуская свободные веса (штангу или гантели, **рис. 1.3.6**), вы обмениваетесь с ними энергией. Вы совершаете работу над штангой, когда делаете жим вверх с постоянной скоростью — толкаете штангу вверх, и она перемещается вверх, — а она совершает работу над вами, когда вы ее опускаете с постоянной скоростью, и она толкает вниз ваши руки. Для того чтобы поднять свободный вес, вы используете химическую потенциальную энергию, полученную из пищи, и при

\* Еще раз напомним: мы изначально допустили, что трение отсутствует. Если же это не так (а это всегда не так в действительности), то работа, совершаемая ради преодоления трения, будет не меньше, чем работа по увеличению потенциальной энергии рояля. Поэтому КПД наклонной плоскости не может превышать 50%, если сила трения не дает поднимаемому телу соскользнуть вниз.





**Рис. 1.3.6.** Этот спортсмен выжимает тяжелую штангу. Когда он толкает ее вверх, то совершает положительную работу, когда опускает — отрицательную. Вместе с тем гриф штанги всегда давит на его руки вниз, поэтому совершает над ними отрицательную работу, когда они поднимаются, и положительную, когда они опускаются. В конце концов человек, выжимая штангу вверх, передает ей энергию, а штанга передает энергию человеку, когда тот ее опускает. Передача энергии от грифа сопряжена с большими усилиями и потенциально травмоопасна, поэтому спортсмена страхует тренер.

этом превращаете работу, совершаемую свободным весом над вами, в тепловую энергию, поэтому в результате десяти жимов энергия, полученная из пищи, превращается в тепловую энергию. Ясное дело, вы разогрелись и проголодались!

К сожалению, когда вы опускаете свободный вес, легко получить травму, так как мышцы и суставы не всегда могут справиться с притоком энергии. По этой причине многие тренажеры конструируют так, чтобы энергия не возвращалась к спортсмену. Самая распространенная модель такого поглощающего энергию тренажера имеет перекладину, которую надо поднимать и опускать. Как и в случае со свободным весом, вы должны толкать перекладину вверх, она перемещается вверх, и вы совершаете работу. Но, в отличие от свободного веса, вы тянете перекладину также и вниз и, следовательно, опять-таки совершаете работу. На обратном пути перекладина отбирает у вас дополнительную энергию, а не возвращает ее вам, как это делает штанга.

С каждым перемещением перекладины вы передаете энергию тренажеру. Он превращает ее в тепловую энергию, от которой нагревается воздух в зале. А вы разогреваетесь во время тренировки лишь потому, что ваш организм неэффективно превращает полученную из пищи энергию в работу. Существенная часть энергии вашего организма превращается в мышцах в тепловую энергию, и вы в буквальном смысле слова “работаете до седьмого пота”.

Приглядитесь внимательнее к тренажерам в фитнес-центре, и вы увидите, что многие из них вынуждают вас совершать над ними больше работы, чем они сами совершают ее над вами. Во время длительных подходов они выкачивают из вас энергию, заставляя вас изо всей мочи нажимать на удаляющиеся части и тянуть к себе те, что к вам приближаются. Например, когда вы крутите педали велотренажера (**рис. 1.3.7**), вы старательно жмете на каждую опускающуюся педаль. И если можно подтянуть к себе педаль при помощи туклипса (ремешка, фиксирующего ступню), вы так же старательно тащите вверх поднимающуюся педаль. Таким образом, велотренажер отбирает у вас энергию и греет воздух в спортзале. А часть вашей энергии он посредством электрогенератора использует для обеспечения работы собственной электроники.

Другой популярный вид спортивных тренажеров имитирует подъем по лестнице. У самого обычного степпера (**рис. 1.3.8**) педаль опускается, когда вы на нее наступаете, а затем, когда вы поднимаете ногу, плавно возвращается в исходное положение. Каждый раз, опуская педаль, вы совершаете довольно большую работу; направленная вниз сила, с которой вы давите на педаль, примерно равна вашему весу, а педаль перемещается на высоту ступени в направлении этой силы. Но когда педаль поднимается, и вы, и она почти не воздействуете друг на друга, и, стало быть, работа почти равна нулю. Получается, что вы поднимаетесь на одну



**Рис. 1.3.7.** Когда вы давите на педаль, вы совершаете над ней работу и таким образом передаете энергию велотренажеру. Тренажер по большей части превращает вашу мускульную энергию в тепловую, отчего нагревается воздух в зале, а также генерирует электричество для собственного электронного оборудования.



**Рис. 1.3.8.** Нажимая на педали этого степпера, девушка совершает над ними работу и передает энергию тренажеру. Она держится за ручки и может давить на каждую опускающуюся педаль с силой, равной собственному весу, совершая, таким образом, максимальную работу. Но к концу долгой тренировки девушка устанет и перенесет часть собственного веса на ручки тренажера. Теперь она будет нажимать на идущие вниз педали с меньшей силой и работу будет совершать тоже меньшую. То есть будет менее интенсивно тренироваться.

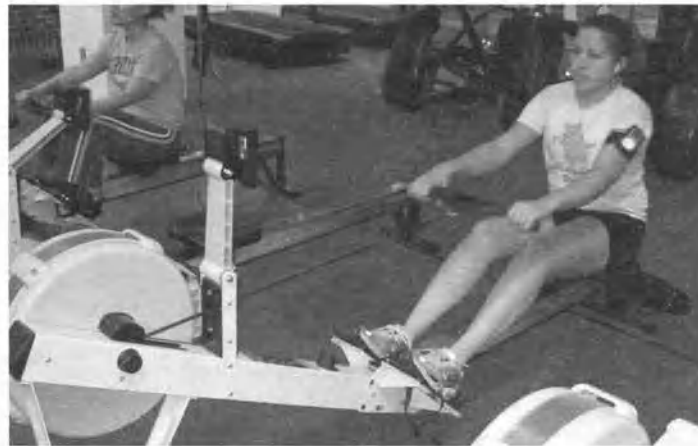
Через несколько минут такого «восхождения» вам захочется опереться на перила, чтобы уменьшить нагрузку. Компенсируя таким образом свой вес, вы почувствуете облегчение, потому что уменьшается сила вашего воздействия на педали и, следовательно, работа по перемещению их вниз. Взгляните на публику в спортзале, и вы увидите, как уставшие люди норовят опереться на неподвижные части тренажеров, чтобы свести к минимуму работу, которую они продолжают над подвижными частями. Большинство из них пребывает в счастливом неведении относительно того, что они, сами того не желая, облегчают и делают менее эффективной программу тренировки.

ступеньку воображаемой лестницы. Ступенька за ступенькой, вы совершаете работу над тренажером и обогреваете спортзал.

На гребном тренажере (**рис. 1.3.9**) вы совершаете работу над его рукоятками, когда тянете их на себя, а они перемещаются к вам. Чем больше усилие, с которым вы их тянете, и чем больше дистанция, на которую вы их перемещаете, тем больше совершаемая с каждым движением работа. В основном эта работа совершается за счет выпрямления ног — они отталкивают ваше тело назад, и вы отъезжаете назад на подвижном сиденье. Такую же работу вы совершаете над педалями и ручками эллиптического тренажера, когда толкаете их в направлении их перемещения.

И наконец, всякий раз, как ваши ноги толкают назад полотно бегущей дорожки и оно уходит назад, вы совершаете работу по его перемещению (**рис. 1.3.10**). Чем энергичнее вы отталкиваетесь и чем шире ваш шаг, тем больше работа, которую вы совершаете с каждым шагом. Вы можете увеличить интенсивность тренировки, если будете сильнее толкать полотно. Скажем, при увеличении угла наклона вам придется отталкиваться с более значительным усилием, иначе вы просто свалитесь с дорожки. Взявшись покрепче за неподвижные поручни, вы уменьшите нагрузку. Однако чем крепче вы будете держаться руками, тем слабее будут ваши толчки ногами и тем меньшую работу вам придется совершать.

Вообще-то неподвижные ручки тренажеров нужны для того, чтобы вы не упали, если вдруг потеряете равновесие, а вовсе не для коррекции усилия. Если какая-то деталь тренажера не перемещается в направлении, в котором вы ее попытались потянуть или толкнуть, то она, как правило, не вносит вклада в тренировку, и когда вы за нее держитесь, вы существенно снижаете общую нагрузку.



**Рис. 1.3.9.** Когда спортсменка тянет на себя ручки гребного тренажера, она совершает над ними работу и посредством тросов передает энергию тренажеру. Эта энергия превращается в тепловую и нагревает тренажер и воздух вокруг него. Нагретый воздух постепенно распространяется по всему спортзалу.

## Скоростной спуск

Если вы работаете грузчиком (или возводите у себя в саду Великую пирамиду), то вы, возможно, используете наклонные плоскости (пандусы) для подъема тяжестей. А вот если вы катаетесь на горных лыжах, на санках или на скейтборде, то различные уклоны играют для вас гораздо более интересную роль. Мы вплотную подошли к изучению физических основ скоростного спуска — давайте займемся этим вопросом.

Во всех этих видах спорта для того, чтобы вы катились вниз с ускорением, используется сила, действующая со стороны уклона. Как мы видели, к вам приложена направленная вниз сила — сумма двух сил, а именно силы тяжести и силы реакции опоры, действующей со стороны склона перпендикулярно его поверхности. Поскольку поверхность склона не горизонтальна, направление действующей на вас силы отличается от вертикали и две силы не компенсируют друг друга полностью. Вы испытываете умеренное воздействие результирующей силы, направленной вдоль склона вниз.



**Рис. 1.3.10.** Толкая назад полотно бегущей дорожки, спортсменки совершают работу по ее перемещению назад. На правом тренажере дорожка установлена с наклоном, поэтому девушка справа отталкивает ее с большей силой и с каждым шагом совершает бóльшую работу, чем ее соседка слева.

Если вы стоите на склоне в обуви на резиновой подошве, поверхность склона толкает вас вверх благодаря силе трения. Эта третья сила противодействует силе, направленной вниз вдоль склона, и препятствует вашему движению с ускорением. Но если избавиться от трения — что и происходит при спуске с горы на лыжах, различных санях и ледянках, на сноуборде или горном велосипеде, — направленной вниз вдоль склона силе ничто не противостоит и вы движетесь с ускорением (**рис. 1.3.11**).

Модуль (величина) ускорения зависит от крутизны склона. В двух предельных случаях — на горизонтальной площадке и отвесном обрыве — ускорение определить легко; на площадке оно равно нулю, а на отвесной плоскости достигает максимального значения — ускорения свободного падения. А каково будет ваше ускорение при промежуточных условиях, надо еще подумать.

Найти ответ нам поможет то, что мы уже знаем о работе, перемещении и направленной вдоль наклонной плоскости силе. Изучая движение по наклонной плоскости, мы видели, что сила, которая направлена вниз вдоль поверхности склона, зависит от отношения перепада высоты к перемещению по склону. В частности, сила, действующая на вас и направленная вдоль склона вниз, численно равна произведению вашего веса на изменение высоты, деленному на перемещение по склону. Например, если через каждые 10 м, пройденные в гору, высота прибавляется на 1 м, на вас будет действовать сила, направленная вниз по склону и равная 0,1 вашего веса, и, следовательно, вы приобретете ускорение, направленное вниз вдоль склона и равное 0,1 ускорения свободного падения.

Что ж, мы подтвердили очевидный факт: чем круче гора, тем стремительнее вы набираете скорость. Однако теперь нам точно известно, как быстро растет скорость, и мы можем примерно предположить, как следует вести себя во время спуска. Направляясь прямо вниз, вы сполна ощутите крутизну горы и будете катиться с максимально возможным на этом склоне ускорением. В результате вы будете очень быстро терять высоту и подвергнетесь воздействию наибольшей возможной силы, направленной вниз по склону. Спуск по очень крутому склону может быть или чрезвычайно возбуждающим, или ужасающе страшным, все зависит от ваших вкусов. Вы несетесь с горы с бешеным ускорением.

Если высокие скорости вас не привлекают, спускайтесь с горы не прямо вниз, а траверсом (зигзагом). Такой способ продлевает спуск и делает его менее крутым. Через каждые 3 м пути прямо вдоль склона высота уменьшается на 1 м, но это вовсе не значит, что вы обязаны катиться вниз с захватывающим дух ускорением, равным 1/3 ускорения свободного падения. Вы можете проложить путь под таким углом, что будете терять 1 м высоты лишь через каждые 10 м движения по склону.



**Рис. 1.3.11.** По ровному тротуару вы катитесь на роликах с постоянной скоростью, но под уклон — совсем другое дело. Направленный вниз вес и перпендикулярная склону сила реакции опоры, действующие на мальчика, не уравновешивают друг друга полностью. Он испытывает действие результирующей силы, направленной вниз вдоль склона, и поэтому катится с горки с ускорением.



**Рис. 1.3.12.** Если снег достаточно скользкий, то с горы можно съехать почти на чем угодно. Хотя эта девушка достигла конечной скорости, когда направленная вниз по склону сила уравновешивается направленной вверх силой сопротивления, она продолжает с постоянной скоростью катиться с горы в бельевой корзине.

Тогда величина ускорения составит терпимую одну тридцатую часть ускорения свободного падения. И хотя на соревнованиях по скоростному спуску горнолыжники обычно выбирают самый прямой путь, чтобы достичь максимально возможного ускорения, люди менее торопливые и менее безрассудные, как правило, спокойно спускаются с горы зигзагом с умеренным ускорением.

Но контроль ускорения и контроль скорости — не одно и то же. Под действием единственной силы, направленной вниз по склону, вы достигнете подножия горы, набрав некую конечную скорость, не зависящую от траектории. Так будет потому, что чем круче склон, тем больше ускорение, но зато и меньше время, за которое вы набрали скорость. Фиксированная конечная скорость — это следствие закона сохранения энергии, о чем мы поговорим подробнее в следующей главе.

Однако вы подвергаетесь действию не только той силы, что направлена вниз по склону. Свое влияние неизбежно окажут сила сопротивления воздуха и сила трения, толкающие вас в направлении, противоположном вектору скорости. Поскольку некоторые из подобных сил сопротивления увеличиваются по мере нарастания скорости, рано или поздно вы достигнете предельно возможной (конечной) скорости спуска. При этой конечной скорости направленные вверх силы сопротивления уравновешивают силу, направленную вниз по склону, и вы потеряете ускорение (рис. 1.3.12). Увеличить конечную скорость можно, выбрав более крутой спуск или уменьшив силы сопротивления. Если для вас важно набрать максимальную скорость, желательнее сохранять контакт с поверхностью склона. Лыжники, которые занимаются скоростным спуском, знают, что после прыжка, пока они в воздухе, единственной горизонтальной силой, действующей на них, является сила сопротивления воздуха, замедляющая движение.

Трение мы будем изучать во второй главе, а сопротивление воздуха — в шестой, но вы, вероятно, уже сейчас понимаете, как их можно уменьшить. Чтобы снизить сопротивление воздуха, надо сделаться меньше размером и стать более обтекаемым. Именно поэтому горнолыжники и сноубордисты во время скоростного спуска группируются, нагнувшись вперед и согнув колени, мотогонщики пригибаются к рулю, бобслеисты и саночники сползают вниз и вперед в своих болидах и санях, а в скелетонах и вовсе ложатся на спину. Чтобы уменьшить трение, спортсмены, как правило, подбирают особую форму спортивного снаряжения и применяют смазки. Лыжники наносят на лыжи специальные мази, в бобслее используются острые полозья, сводящие к минимуму трение в ледяном желобе, а велосипедисты тщательно смазывают оси колес. Конечно, необходимо преодолеть и направленную вверх по склону силу сопротивления, возникающую из-за сминания или вдавливания поверхности, по которой вы мчитесь, но если снег не слишком рыхлый, а ваш вес правильно распределен по длинным лыжам, большим саням или большому, хорошо накачанному тюбингу, скорость будет головокругительной.

Нам осталось обсудить еще один вид спорта, связанный со спуском по наклонной поверхности, а именно серфинг. Покатая волна, как и склон земной тверди, действует на вас с силой, перпендикулярной ее поверхности, и, следовательно, к вам приложена сила, направленная вниз и вперед. Как всегда в таких случаях, вы скользите вниз тем быстрее, чем круче волна, но можете уменьшить ускорение, если направите доску под углом к волне. И поскольку силы сопротивления увеличиваются по мере нарастания скорости, ваша скорость быстро достигнет конечного значения.

Главное отличие волны от обычного холма заключается в том, что волна вырастает позади вас, в то время как вы скользите на доске по ее передней поверхности. Пока вы не уйдете с волны или пока она не разобьется о берег, вы можете скользить по ней, практически не теряя высоты! Но, направившись прямо вниз, к ложбине, вы приобретете большое ускорение и при высокой конечной скорости быстро окажетесь перед волной. Чтобы оставаться на склоне, надо рассекать фронт волны под таким углом, чтобы конечная скорость, с которой вы будете двигаться к берегу, была равна скорости самой волны. Вы останетесь на склоне волны, пока она не добежит до берега. Вот тут уже придется ловить новую волну.

## ГЛАВА 2

# ЕЩЕ О ДВИЖЕНИИ ТЕЛ

---

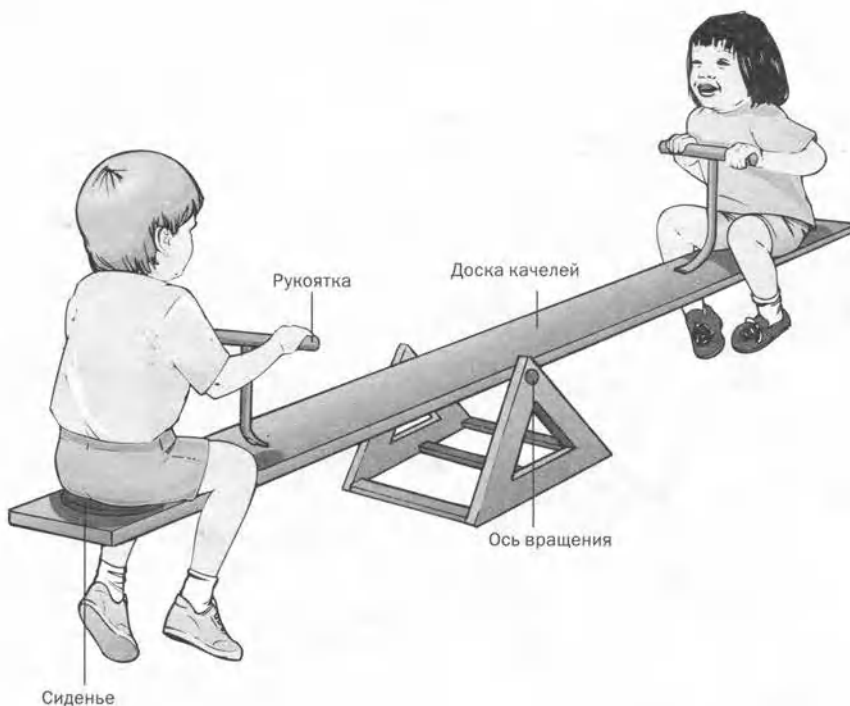
**Я** столько лет провел в университетских аудиториях и научных лабораториях, что мне уже трудно представить себе, каково это — приступить к изучению физики с нуля. Начиная занятия с очередной группой, я стараюсь облегчить студентам первые шаги, но это все же нечто другое. У меня самого на смену юношеской растерянности и ощущению тайны давно пришло чувство уверенности и свободы.

Хорошая новость заключается в том, что я кое-чему научился за все эти годы и обычно понимаю, чего именно я не понимаю. Следовательно, я, скорее всего, не буду нести всякий вздор и импровизировать на ходу. С другой стороны, я, подобно старому экскурсоводу или актеру, в какой-то степени привык брести по проторенной колее — и это, конечно, минус. Разумеется, я не брошу вас на произвол судьбы в глухом переулке и не буду подсовывать вам непрофессиональную халтуру под видом актерского мастерства, однако могу все же не устоять перед искушением заткнуть вас в свой любимый магазинчик или заставить вас выслушать мою собственную версию монолога Гамлета.

Это означает также, что я порой могу излагать материал не в самом логичном порядке и ненароком пропущу какие-то важные моменты. Лучше бы, конечно, нам с вами обсудить все это при личной встрече, но раз уж я на протяжении всей первой главы не услышал от вас ни звука, придется мне и дальше продолжать мой путь и пытаться предугадать ваши вопросы и недоумения. И хотя меня самого вряд ли поразят новизной открытия, которые мы с вами будем делать на каждом повороте нашей дороги, я все равно каждый раз узнаю что-то новое для себя, показывая другим хорошо знакомые мне места. Но я постараюсь, чтобы новые впечатления не сбили меня с пути, и надеюсь, что чтение этой книги даст вам не меньше, чем мне дала работа над ней.

В предыдущей главе мы изучали перемещение тел и познакомились с понятием энергии, одной из основных сохраняющихся величин. Однако при движении радиус-вектор тела не всегда меняется, а энергия — не единственная сохраняющаяся величина. В этой главе мы рассмотрим другой вид движения — вращение — и еще две сохраняющиеся величины: импульс и момент импульса. Вращающиеся тела встречаются повсеместно, и мы правильно сделаем, если, прежде чем двинуться дальше, изучим законы их движения. Имея в своем арсенале еще и эти знания, мы подготовимся к рассмотрению физики разнообразных механических систем.

- 46 **2.1 Качели**  
*Как дети уравнивают и раскачивают качели.*
  
- 57 **2.2 Колеса**  
*Как трение влияет на движение и как колеса уменьшают это влияние.*
  
- 66 **2.3 Аттракцион "Автодром"**  
*Как столкновение машин влияет на их движение.*



## 2.1 Качели

Не только пандусы, о которых мы говорили в разделе 1.3, дают выигрыш в силе. В данном разделе мы займемся еще одним похожим приспособлением — качелями, которые представляют собой разновидность рычага. Изучая качели, мы вновь встретимся с уже знакомыми нам законами механики. Но теперь мы рассмотрим эти законы в ином контексте — в контексте вращательного движения.

### Качели

Любому ребенку, которому приходилось играть на детской площадке с другими детьми, прекрасно известно, что качаться на качелях лучше всего с кем-то, кто весит примерно столько же, сколько ты сам (**рис. 2.1.1, а**). Партнеры, подходящие друг другу по весу, уравнивают качели, что позволяет легко раскачиваться. И наоборот, если маленький ребенок качается с большим, то старший рискует больно стукнуться попой, когда его плечо качелей опустится слишком быстро (**рис. 2.1.1, б**). Зато малыш взлетит вверх, как настоящий астронавт!

Решить проблему разницы в весе можно разными способами. Например, если напротив большого ребенка на другое плечо качелей усядутся двое маленьких. И любой ребенок прекрасно знает, что если тот, кто потяжелее, сдвинется поближе к оси вращения (к центру качелей), то качели тоже уравниваются (**рис. 2.1.1, в**) и качаться будет столь же удобно, как если бы седоки на обоих концах качелей весили одинаково. Этот весьма полезный прием мы обсудим чуть позже. Но для начала давайте подробнее изучим принципы вращательного движения.

Простоты ради мы не будем учитывать массу и вес самих качелей. В таком случае на качели действуют всего три силы (**рис. 2.1.1**) — две направленные вниз (вес двух детей) и одна направленная вверх (сила реакции центральной опоры). Взглянув на эти три силы, мы сразу же вспоминаем о равнодействующей и ищем некое общее ускорение качелей и “наездников”. Однако мы знаем, что качели всегда остаются на отведенном им месте на детской площадке и вряд ли в ближайшее время вдруг переместятся в захолустье штата Мичиган или к центру Земли. Поскольку неподвижная опора качелей всегда обеспечивает действие силы, направленной вверх и вбок (эта сила необходима для того, чтобы предот-

вратить возникновение ускорения во всей системе), то приложенная к качелям результирующая сила равна нулю и они не могут оторваться от земли. В общем случае перемещение тела с одного места на другое называется поступательным движением. Качели не участвуют в поступательном движении, но могут поворачиваться относительно оси (или точки опоры) и, следовательно, участвуют в другом виде движения. Движение вокруг неподвижной точки (или оси) называется вращательным движением. Пример вращательного движения — движение стрелок часов по циферблату.

Качели интересны именно как пример вращательного движения. Весь их смысл заключается в способности вращаться, благодаря чему один ребенок поднимается, а другой опускается. Вам может показаться, что подъем и спуск — это не совсем вращение, однако если бы на пути опускающегося плеча качелей не стояла земля, то качели совершали бы полный оборот вокруг своей центральной оси. Что же заставляет качели вращаться? И какие выводы мы можем сделать, наблюдая за их вращением?

Чтобы ответить на эти вопросы, надо изучить кое-какие новые физические величины, связанные с вращением, и рассмотреть законы вращательного движения, которые выражают соотношение этих величин. Мы можем сделать это на примере качелей и других вращающихся объектов, а затем сравним поступательное и вращательное движение.

Представьте себе, что вы придерживаете качели (рис. 2.1.1, а) в горизонтальном положении, пока ребенок слева слезает с них. Теперь представьте, что вы их отпустили. Как только вы это сделаете, качели начнут поворачиваться и ребенок справа начнет опускаться. Поначалу качели вращаются медленно, затем быстрее и быстрее, пока бедный малютка с громким стуком не ударится о землю.

Если бы нас интересовало только собственно вращение, мы описали бы движение качелей следующим образом:

Сначала качели не вращаются вовсе. Когда мы их отпускаем, они начинают вращаться по часовой стрелке. Скорость вращения качелей по часовой стрелке постоянно возрастает до тех пор, пока плечо качелей не ударится о землю.

Это описание сильно напоминает описание полета мяча, упавшего из состояния покоя:

Сначала мяч не движется вовсе. Когда мы его отпускаем, он начинает перемещаться вниз. Направленная вниз скорость падения мяча постоянно возрастает до тех пор, пока он не стукнется о землю.

В эпизоде с качелями описывается вращательное движение, а в эпизоде с мячом — поступательное. Сходство этих явлений — не случайное совпадение; принципы и законы вращательного движения во многом аналогичны принципам и законам движения поступательного. То, что мы уже знаем о поступательном движении, поможет нам разобраться и с вращением.

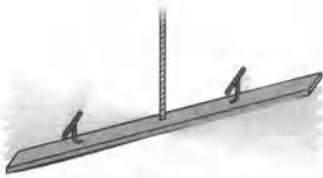
## Движение раскачивающихся качелей

В предыдущей главе мы рассмотрели явление инерции в поступательном движении — движущееся тело стремится продолжить движение, неподвижное тело стремится остаться в покое. Это положение привело нас к первому закону Ньютона для поступательного движения. Именно для поступательного — это важное уточнение! — потому что теперь мы будем изучать соответствующие положения теории вращательного движения.

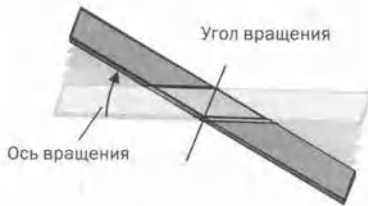
Знакомство с новой темой мы начнем с анализа поведения качелей, свободных от внешних воздействий, которые могли бы вызвать вращение. Далее мы посмотрим, как реагируют качели на внешние воздействия — со стороны собственной оси вращения и со стороны юных пользователей. Поскольку вращательное и поступательное движения имеют много общего, в этой главе проводятся близкие параллели с ранее изученными процессами — катанием на коньках и бросанием мячей.



Рис. 2.1.1. (а) Если на качелях сидят дети с одинаковым весом, качели уравновешены. (б) Если вес у детей разный, более тяжелый ребенок опускается. (в) Если более тяжелый ребенок придвинется ближе к оси вращения, качели снова уравновесятся.



**Рис. 2.1.2.** Доска качелей свободно подвешена на веревке, закрепленной посередине доски. Никакая сила не закручивает доску, поэтому она равномерно вращается вокруг зафиксированной в пространстве оси.



**Рис. 2.1.3.** Угловые координаты качелей можно задать относительно их начального горизонтального положения, обозначив ось, вокруг которой они поворачиваются, пока не совершат какое-то перемещение в новую позицию, а также угол, который они описывают при вращении.



**Рис. 2.1.4.** Доска качелей поворачивается вокруг показанной на рисунке оси вращения. Направление угловой скорости определяется по правилу правой руки.

\* Можно также назвать это “правилом штопора (буравчика)”: когда мы поворачиваем штопор, он врезается в пробку в том направлении, в котором надо направить вектор угловой скорости.

Предположим, что на детской площадке рядом с вашим домом устанавливаются новые качели. Пока что это просто доска, болтающаяся на веревке (**рис. 2.1.2**). Веревка привязана к середине доски и компенсирует ее вес, но больше никакого воздействия на нее не оказывает. Предположим далее, что доска качелей может вращаться и поворачиваться во все стороны — ничто ее специально не подталкивает и не крутит — и веревка не мешает ее движению. Итак, подвешенные качели могут повернуться в любом направлении. Вы, наблюдатель, неподвижно стоите рядом и смотрите на качели — как же они себя поведут?

Пока качели неподвижны, они так и останутся неподвижными. Но если они вращаются, то продолжают равномерно вращаться вокруг некоей оси в пространстве. Что заставляет их продолжать вращение? Момент инерции. Вращающееся тело стремится продолжить вращение; если тело не вращается, оно и не стремится вращаться. Так устроена наша Вселенная.

Чтобы точнее описать момент инерции и вращательное движение качелей, необходимо дать определение некоторым физическим величинам, связанным с вращательным движением. Первая из них — угловая координата. В каждый момент времени качели ориентированы определенным образом, то есть имеют определенные угловые координаты. Угловая координата, или угловое перемещение, указывает положение качелей относительно некоего заданного направления; ее можно задать, указав, насколько качели отклонились от начального положения и от оси, вокруг которой они поворачиваются. Угловое перемещение — это вращательный по значимости вектор, направленный вдоль оси вращения и равный по модулю углу поворота (**рис. 2.1.3**).

В системе СИ угловые координаты (и угловое перемещение) измеряются в радианах, естественных единицах измерения углов. Эта единица называется естественной, потому что она, в отличие от большинства единиц измерения, выводится непосредственно из геометрии, а не возникла волею какого-то ученого или в результате какой-то договоренности ученых. Согласно правилам геометрии, длина окружности с радиусом, равным 1, равна  $2\pi$ . Чтобы выразить угол через дугу этой окружности, мы используем радианы. Например, в полном круге ( $360^\circ$ )  $2\pi$  радиан, а прямой угол ( $90^\circ$ ) равен  $\pi/2$  радиан. Поскольку радианы — естественные единицы, они часто не указываются при расчетах и определении производных единиц.

Когда качели вращаются, меняется их угловая координата; иначе говоря, они имеют угловую скорость. Угловая скорость — первый важный для нас вектор, который характеризует вращательное движение и служит мерой быстроты изменения угловой координаты; угловая скорость задается модулем (собственно угловой скоростью вращения) и направлением оси, вокруг которой происходит вращение. Угловая скорость качелей — это изменение угла, деленное на время, в течение которого менялся угол:

$$\text{угловая скорость} = \frac{\text{изменение угла}}{\text{время}}$$

Единица измерения угловой скорости в СИ — радиан в секунду (сокращенно  $1/\text{с}$ ).

Ось вращения качелей представляет собой линию в пространстве, вокруг которой они поворачиваются. Но одной только этой линии недостаточно — надо еще знать, в какую сторону поворачиваются качели, по часовой стрелке или против.

Чтобы устранить неопределенность, вспомним, что любая прямая имеет два направления. Обозначив прямую, вокруг которой происходит вращение, мы можем посмотреть на плоскость вращения качелей с разных сторон. Глядя с одной стороны, мы увидим, что качели поворачиваются по часовой стрелке; посмотрим с другой стороны — и вращение явно происходит против часовой стрелки. Давайте договоримся, что мы смотрим с такой точки зрения, что качели вращаются по часовой стрелке, и что ось вращения направлена от нас к качелям. Такое соглашение называется правилом правой руки: если обхватить ось вращения правой рукой так, чтобы четыре пальца были направлены в направлении вращения, то отставленный большой палец укажет направление оси вращения (**рис. 2.1.4**)\*. Когда вы попытаетесь применить правило правой руки на практике, не забудьте переложить эту книгу в левую руку (см. **1**).

Отметим, что соблюдение это условие не так важно, как понять, почему при определении вектора угловой скорости необходимо указывать направление вра-



щения. Подобно тому, как вектор скорости поступательного движения характеризуется собственно скоростью (модулем) и направлением, в котором происходит поступательное движение, так и угловая скорость имеет численное значение (скорость вращения) и направление, в котором происходит вращение.

Теперь мы можем описать вращательное движение висящих на веревке качелей. Поскольку на них не действуют внешние силы и они имеют момент инерции, их угловая скорость постоянна. Подвешенные качели постоянно поворачиваются с одной и той же угловой скоростью вокруг одной и той же оси.

Как вы, наверное, догадываетесь, так ведут себя не только качели. Это и есть первый закон Ньютона для вращательного движения: если жесткое тело не раскачивают и не подвергают внешним воздействиям, оно вращается с постоянной угловой скоростью и совершает одинаковые повороты за равные промежутки времени вокруг фиксированной оси вращения. Под внешними воздействиями здесь подразумеваются моменты силы — так в научном мире называют вращающие (они же крутящие) моменты. Когда вы отвинчиваете крышку банки или запускаете волчок, вы прикладываете к ним момент силы.

Этот закон неприменим к качающимся телам и телам изменчивой формы, потому что они участвуют в более сложном движении. Такие тела подчиняются более общему закону — закону сохранения импульса, который мы будем изучать в разделе 2.3.

### Первый закон Ньютона для вращательного движения

Если несжимаемое тело не качается и не подвергается действию внешних моментов сил, то оно вращается с постоянной угловой скоростью и за равные промежутки времени совершает одинаковые повороты вокруг фиксированной оси вращения.

## Центр масс качелей

Но не только на детской площадке можно наблюдать вращение тел в отсутствие моментов сил — тамбур-мажор во главе марширующего оркестра ловко играет своим жезлом, подкидывая его над головой, клоуны в цирке перебрасываются вращающимися булавами. Однако это довольно сложные процессы, поскольку эти свободно движущиеся тела участвуют одновременно и во вращательном, и в поступательном движении. Жезл тамбур-мажора вращается и перемещается вверх и вниз, булава клоуна летит по дуге и при этом вращается, а качели упадут, вращаясь, если веревка оборвется. Как же разделить поступательное движение тела и вращательное?

И вновь нам на помощь приходят принятые в физике волшебные упрощения. В свободно движущемся теле или вблизи него есть некая особая точка, относительно которой масса тела уравновешена и вокруг которой тело вращается естественным образом; эта точка — центр масс. Ось вращения проходит через эту точку, поэтому центр масс свободно вращающегося тела не движется, если только вращающееся тело одновременно не движется поступательно с отличной от нуля скоростью. Центр масс обычного мяча совпадает с его геометрическим центром, а положение центра масс тела менее правильной формы зависит от распределения массы этого тела. В качестве первого опыта попробуйте закрутить небольшой предмет на гладком столе и посмотрите, вокруг какой оси он будет вращаться (рис. 2.1.5).

Мы можем различить поступательное и вращательное движение тела, наблюдая за центром масс. Когда жонглерская булава летит по дуге, ее центр масс перемещается по простой траектории, которую мы обсуждали в разделе 1.2 на примере падающих мячей (рис. 2.1.6). Вместе с тем вращение булавки вокруг ее центра масс представляет собой пример движения тела, на которое не действуют внешние моменты сил: если тело не раскачивать, оно вращается с постоянной угловой скоростью.

В этой книге часто рассматриваются тела, которые совершают поступательное и вращательное движение одновременно, и полезно помнить, что, определив центр масс, можно различить два этих вида движения. Рабочие наверняка уста-



❶ У любого преподавателя физики, и я не исключение, непременно находится в группе несколько студентов, которые воспринимает правило правой руки наоборот. Я никак не мог догадаться, в чем же дело, пока во время одного семинара кто-то не обратил мое внимание на то, что большинство студентов делают записи правой рукой. Чтобы не класть на стол ручку (и потом снова не брать ее), некоторые из них пытаются проверить правило правой руки с помощью левой — и у них ничего не выходит. Вероятно, они полжизни мучаются, не понимая, почему же у них такая неудобная обувь, — по схожей причине.

Надпись на вывеске: "Товары для левшей".



Рис. 2.1.5. Булава вращается вокруг своего центра масс, в то время как сам он неподвижен.

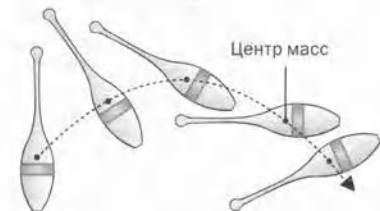
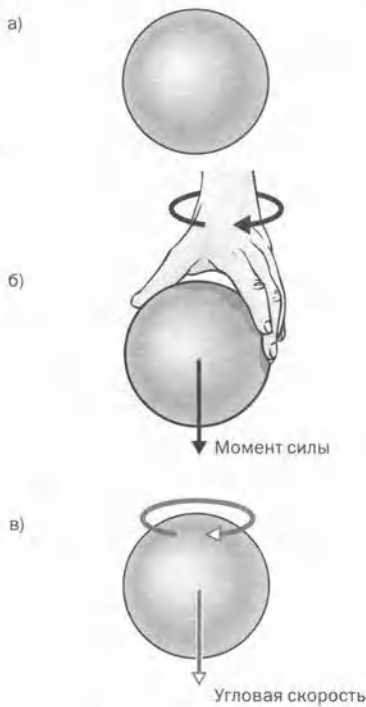


Рис. 2.1.6. Булава жонглера летит по дуге и вращается вокруг центра масс, в то время как центр масс перемещается по характерной для падающего тела траектории.



**Рис. 2.1.7.** Если сначала мяч покоится (а), а потом под действием момента силы закручивается (б), то он приобретает угловую скорость (в), направленную в ту же сторону, что и момент силы, вызвавший вращение.



**Рис. 2.1.8.** 16 мая 1992 года трое астронавтов отремонтировали в открытом космосе телекоммуникационный спутник *INTELSAT*, но сначала им пришлось вручную остановить его вращение. Момент инерции спутника был велик, поэтому его угловая скорость затухала очень медленно, хотя астронавты приложили немалые моменты сил.

новят опору качелей так, чтобы она проходила через центр масс или как можно ближе к нему. При таком положении опоры поступательное движение качелей исключается, происходит только практически свободное от внешних воздействий вращательное движение вокруг центра масс и вокруг одной оси.

## Реакция качелей на момент силы

И вот рабочие ушли на обеденный перерыв, и качели по-прежнему болтаются на веревке. Почему при этом не меняются ни скорость вращения, ни положение оси вращения качелей? Потому что они обладают моментом инерции (см. 2). Момент инерции служит мерой инерции вращения тела, его способности сопротивляться изменению угловой скорости. Момент инерции зависит от массы тела и от ее распределения по объему тела. Единица измерения момента инерции в СИ — килограмм-метр<sup>2</sup> (сокращенно кг·м<sup>2</sup>). Поскольку качели обладают инерцией вращения, их угловая скорость меняется только в том случае, если что-то извне подкрутит их. Иными словами, если на них будет действовать момент силы.

Момент силы — это второй связанный с вращательным движением вектор, и он имеет модуль и направление. Чем больше момент силы, который действует на качели, тем заметнее меняется их угловая скорость. В зависимости от направления момента силы можно заставить качели вращаться быстрее или медленнее и даже поворачиваться вокруг другой оси. А как определить направление момента силы? Например, можно представить себе, что этот момент силы приложен к неподвижному мячу, который плавает в воде (рис. 2.1.7, а, б). Мяч начинает вращаться и приобретает отличную от нуля угловую скорость (рис. 2.1.7, в). Направление угловой скорости совпадает с направлением момента силы. Единица измерения момента силы в СИ — ньютон-метр (сокращенно Н·м).

Чем больше момент инерции тела, тем медленнее в ответ на действие данного момента силы меняется угловая скорость (рис. 2.1.8). Подкрутить кончиками пальцев баскетбольный мяч легко, а более тяжелый шар для боулинга — значительно труднее. Большой момент инерции шара для боулинга объясняется в первую очередь его большей по сравнению с баскетбольным мячом массой.

Однако момент инерции зависит и от формы тела, особенно от того, насколько удалена основная часть его массы от оси вращения. Чем дальше от оси вращения сконцентрирована основная часть массы, тем быстрее эта часть должна ускоряться (поскольку все тело испытывает угловое ускорение) и тем сильнее будет эффект рычага, возникающий как противодействие ускорению. Но о рычагах мы поговорим чуть позже, а сейчас уточним, что именно следует из удаления основной части массы тела от оси вращения: вклад этой части массы в общий момент инерции пропорционален квадрату расстояния от оси вращения. Именно поэтому момент инерции шарика, слепленного из теста для пиццы, меньше, чем момент инерции раскатанной лепешки теста той же массы. И чем больше пицца, тем труднее и раскрутить, и остановить лепешку из теста.

Раз момент инерции тела зависит от положения массы относительно оси вращения, перемена оси с большой вероятностью приведет к изменению момента инерции. Например, при вращении теннисной ракетки вокруг оси ручки (рис. 2.1.9, а) момент инерции меньше, чем при ее вращении вокруг линии, проходящей через центр (шейку) ракетки (рис. 2.1.9, б). В первом случае ось вращения проходит по ручке и большая часть массы ракетки сосредоточена вблизи оси вращения, поэтому момент инерции мал. Если же ракетка вращается вокруг линии, перпендикулярной ручке, то верх головки ракетки и конец ее ручки удалены от оси вращения, и момент инерции увеличивается. Но если вы держите ракетку в руке таким образом, что она вращается вокруг вашего плеча, а не вокруг собственного центра масс, то момент инерции возрастает еще больше (рис. 2.1.9, в).

Если к подвешенным на веревке качелям приложить момент силы, их угловая скорость изменится, то есть они приобретут ускорение — третий интересующий нас вектор, связанный с вращательным движением. Угловое ускорение служит мерой быстроты изменения угловой скорости качелей. Это аналог

обычного ускорения, которое говорит о том, как быстро меняется скорость поступательного движения. Как и положено ускорению, угловое ускорение имеет модуль и направление. Тело приобретает угловое ускорение, если возрастает или падает скорость его вращения или меняется направление угловой скорости. Единица измерения углового ускорения в СИ — радиан в секунду<sup>2</sup> (сокращенно  $1/c^2$ ).

Действующий на качели момент силы, их момент инерции и угловое ускорение связаны простым соотношением. Угловое ускорение качелей равно действующему на них моменту силы, деленному на момент инерции, или

$$\text{угловое ускорение} = \frac{\text{момент силы}}{\text{момент инерции}} \quad (2.1.1).$$

Как мы видим, направление углового ускорения качелей совпадает с направлением момента приложенной к ним силы.

Мы сформулировали второй закон Ньютона для вращательного движения. Записывая уравнение в таком виде, мы отличаем причину (момент силы и момент инерции) от следствия (углового ускорения). Тем не менее в общепринятой форме эта грань не проводится, так что равенство традиционно имеет следующий вид:

$$\text{момент силы} = \text{момент инерции} \times \text{угловое ускорение} \quad (2.1.2).$$

Это похоже на второй закон Ньютона для поступательного движения (сила = масса  $\times$  ускорение), но вместо силы теперь стоит момент силы, вместо массы — момент инерции, а вместо ускорения — угловое ускорение. Однако этот закон неприменим к вращению тел с меняющимся направлением оси вращения, потому что в этом случае на них влияют сразу несколько моментов инерции — помните наш пример с теннисной ракеткой? Движение таких тел описывается более сложным законом.

### Второй закон Ньютона для вращательного движения

Момент силы, действующий на тело, равен произведению момента инерции тела на его угловое ускорение. Направление углового ускорения совпадает с направлением момента силы.

Формула 2.1.1 представляет собой уравнение, стало быть, ее левая и правая части равны. Любое изменение момента силы, с которым вы действуете на качели, неизбежно сопровождается пропорциональным изменением углового ускорения. Поэтому чем энергичнее вы раскручиваете качели, тем быстрее будет меняться их угловая скорость.

Кроме того, можно сравнить действие одного и того же момента силы на тела с разными моментами инерции. Из уравнения 2.1.1 следует, что уменьшение момента инерции приводит к соответствующему возрастанию углового ускорения. Если вместо настоящих качелей взять качели для кукольного домика, момент инерции будет меньше, а угловое ускорение — больше. Таким образом, при равных моментах сил угловая скорость игрушечных качелей меняется быстрее угловой скорости настоящих качелей на детской площадке.

Подведем итоги:

- 1 Скорость изменения угловых координат определяется угловой скоростью.
- 2 Угловое ускорение показывает, как быстро меняется угловая скорость.
- 3 Для того чтобы вы приобрели угловое ускорение, на вас должен действовать момент силы.
- 4 Ориентацию тела указывают угловые координаты.
- 5 Чем больше момент инерции, тем меньше угловое ускорение при данном моменте силы.

2 Для большей простоты и ясности в этой книге мера инерции вращения тела называется массой вращения, однако более правильный термин — момент инерции.

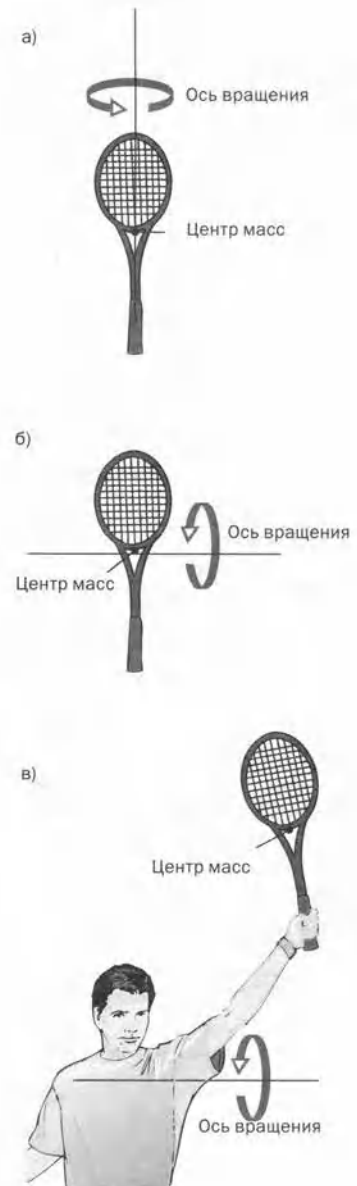


Рис. 2.1.9. Момент инерции теннисной ракетки зависит от выбора оси вращения. При вращении вокруг ручки (а) он мал, при обороте головки ракетки вокруг ручки (б) достаточно велик. Если вы заставите ракетку вращаться вокруг вашего плеча (в), момент инерции будет еще больше.

Величина	Единицы СИ	Английские единицы	СИ > английские единицы	Английские единицы >СИ
Угловая координата	радиан (1)	радиан (1)		
Угловая скорость	радиан в секунду (1/с)	радиан в секунду (1/s)		
Угловое ускорение	радиан в секунду <sup>2</sup> (1/с <sup>2</sup> )	радиан в секунду <sup>2</sup> (1/s <sup>2</sup> )		
Момент силы	ньютон-метр (Н·м)	фут-фунт-сила (ft·lbf)	1 Н·м = 0,73757 ft·lbf	1 ft·lbf = 1,3558 Н·м
Момент инерции	килограмм-метр <sup>2</sup> (кг·м <sup>2</sup> )	фунт-фут <sup>2</sup> (lbm·ft <sup>2</sup> )	1 кг·м <sup>2</sup> = 23,730 lbm·ft <sup>2</sup>	1 lbm·ft <sup>2</sup> = 0,042140 кг·м <sup>2</sup>

\* Ральф Уолдо Эмерсон, американский писатель, поэт и философ (1803–1882). — Прим. перев.

То, что мы говорим о физических величинах, связанных с вращательным движением, очень похоже на то, что мы говорили о параметрах поступательного движения (с. 22). Я намеренно выстроил материал о вращении тел таким образом, чтобы подчеркнуть аналогию между вращательным и поступательным движением. Эмерсон\* говорил, что “глупое пристрастие к последовательности изложения — злой дух недалеких умов”, но я не боюсь насмешек философа — для меня главное донести свою мысль как можно более ясно.

## Силы, моменты силы и качели

Наконец качели смонтированы и установлены на опоре, которая проходит точно через их центр масс, поэтому опора лежит на естественной оси вращения качелей. Таким образом, опора принимает на себя вес качелей и позволяет им свободно поворачиваться согласно первому закону Ньютона для вращательного движения. А это означает, что качели, на которых никто пока не сидит, вращаются вокруг этой опоры (своей оси) с постоянной угловой скоростью.

\* \* Настоящие качели обычно закреплены не совсем так, как описывает автор: ось вращения проходит не через центр масс качелей, а слегка над или слегка под ним. В первом случае качели стремятся принять горизонтальное положение, во втором один из концов качелей опускается до земли. Эту картину мы и наблюдаем на детской площадке. Однако в идеальном случае, когда ось вращения проходит через центр масс, качели должны вести себя именно так, как описано.

В отсутствие седоков качели находятся в состоянии равновесия, а следовательно, момент силы, действующий на них, равен нулю. Благодаря этому они не имеют углового ускорения. Вы, наверно, думаете, что уравновешенные качели всегда принимают горизонтальное положение, но это вовсе не обязательно. Определенно можно сказать лишь одно: их угловая скорость не меняется. Если они вращаются, то так и будут стабильно вращаться вокруг своей опоры; если они неподвижны, то и застынут в том положении, в котором их оставили, — будь оно горизонтальное или нет\* \*.

Для того чтобы изменить угловую скорость качелей, необходимо приложить к ним момент силы. Но как именно это сделать? Надавите рукой на один конец качелей (рис. 2.1.10, а). Качели наклонятся, и ваш конец коснется земли. Вы приложили к качелям момент силы.

Но сначала вы приложили к качелям силу — надавили на них, — поэтому сила и момент должны быть связаны какой-то зависимостью. Так и есть — сила производит момент силы, а момент силы производит силу. Чтобы эта взаимосвязь стала более понятна, давайте посмотрим, как не вызвать воздействия на качели момента силы.

Что произойдет, если вы надавите на качели прямо над их опорой (рис. 2.1.10, б)? Ровным счетом ничего — углового ускорения не возникнет. Если немного отодвинуться от опоры, можно заставить качели повернуться, но надо будет приложить изрядную силу. Целесообразнее надавить на край качелей, тогда они даже при небольшом усилии повернутся на опоре. Расстояние от точки опоры до места приложения силы называется плечом силы; по общему правилу, чем длиннее плечо, тем меньшая сила нужна для того, чтобы сообщить телу угловое ускорение заданной величины. Результат нашего первого опыта таков: если приложить силу дальше от точки (или оси) вращения, момент силы будет больше. Иначе говоря, момент силы пропорционален плечу силы.

Еще один неэффективный способ раскатать качели — это толкать их вдоль доски в сторону опоры или от нее (рис. 2.1.10, в). Сила, направленная к оси вращения или в противоположную сторону, не создает момента силы относительно оси вращения. Хотя бы проекция этой силы должна быть перпендикулярна плечу — по сути дела, вектору, направленному от опоры вдоль поверхности качелей к месту приложения силы. Второй экспериментальный результат: приложить силу надо таким образом, чтобы по крайней мере ее составляющая (проекция) была перпендикулярна ее плечу. Только эта составляющая влияет на момент силы. Хо-

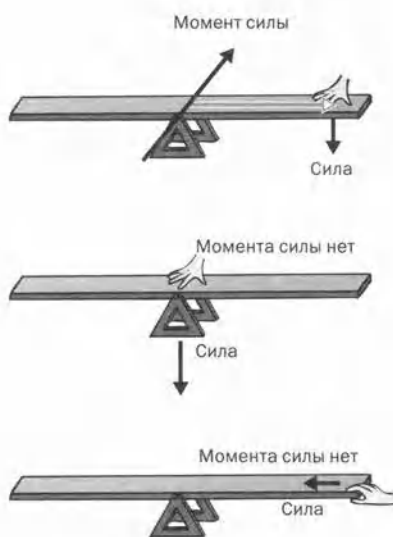


Рис. 2.1.10. (а) Если вы надавите на качели в точке, удаленной от опоры, на них начнет действовать момент силы. Но если надавить точно над опорой (б) или направить усилие вдоль доски к опоре (в), момента силы не возникнет.

тите, чтобы момент силы был максимальным? Давите в направлении, перпендикулярном плечу силы.

Подытожим наши экспериментальные наблюдения: момент силы, вызванный приложенной силой, равен произведению силы на ее плечо, причем учитывается только та составляющая силы, которая направлена перпендикулярно плечу:

$$\text{момент силы} = \text{плечо силы} \times \text{сила, перпендикулярная плечу} \quad (2.1.3)$$

Направление момента силы также зависит от направления силы и плеча. Эти три направления связаны правилом правой руки (рис. 2.1.11). Если направить указательный палец правой руки по направлению плеча и согнуть средние пальцы в направлении приложения силы, большой палец укажет направление момента силы. На рис. 2.1.11, а, плечо силы направлено вправо, сила — вниз, а вектор момента силы как бы протыкает страницу, так что качели приобретают угловое ускорение, поворачиваясь по часовой стрелке. На рис. 2.1.11, б, плечо силы направлено в противоположную сторону — и момент силы тоже.

Что произойдет, если вы с вашим товарищем по играм одновременно надавите на оба сиденья качелей? Вы произведете два момента силы относительно опоры качелей, направленных друг против друга. Качели отреагируют на результирующий момент силы — сумму двух действующих на них крутящих моментов. Поскольку эти моменты сил противоположны, они хотя бы отчасти компенсируются. Если очень постараться и приложить одинаковые силы на равных расстояниях от опоры, моменты сил окажутся равными по модулю, а их сумма будет равна нулю. Качели испытывают действие нулевого крутящего момента и находятся в состоянии равновесия.

Теперь понятно, почему так важно правильно посадить детей разного веса на качели. Каждый ребенок давит на качели силой своего веса, направленной вниз, и при правильном распределении веса по обе стороны от опоры сумму моментов сил можно свести к нулю. При нулевом результирующем моменте сил относительно опоры качели будут находиться в равновесии.

На самом деле, собственный вес качелей распределяется точно так же. Хотя с обоих концов действуют моменты сил, их сумма равна нулю и на вращение качелей никак не влияет.

## Результирующий момент силы и выигрыш в силе

Величина крутящего момента, который производит ребенок за счет своего веса, зависит от того, как далеко от опоры он сидит. Если он сядет прямо над опорой, плечо силы будет равно нулю и крутящего момента не возникнет; но если сесть на самый краешек качелей, плечо будет большое и момент силы также будет велик. Поерзав по качелям в ту или иную сторону, ребенок может отрегулировать момент силы, вызванный его весом, благо качели дают возможность получить выигрыш в силе. В разделе 1.3 мы видели, что выигрыш в силе дают устройства, которые перераспределяют нагрузку и расстояние с тем, чтобы совершалась определенная работа. Малая сила, приложенная к концу качелей, совершает такую же работу, как большая сила, приложенная рядом с опорой.

Чтобы понять, каким образом качели обеспечивают выигрыш в силе, представьте себе двух детей, сидящих на концах доски. Пусть им обоим по пять лет, они имеют одинаковый вес 200 Н и сидят на противоположных краях качелей — на расстоянии 2 м от опоры (рис. 2.1.12, а). Каждый из них производит момент силы 400 Н·м ( $200 \text{ Н} \times 2 \text{ м} = 400 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ), который заставляет качели поворачиваться на опоре. Но эти моменты сил направлены навстречу друг другу, поэтому в сумме дают нуль. Результирующий момент силы равен нулю, качели уравновешены.

Если вместо кого-то из этих малышей на качели вдруг усядется девочка-подросток весом 400 Н, ей надо будет устроиться где-то посередине между краем качелей и опорой (рис. 2.1.12, б). При удвоенной силе и в половину меньшем плече силы крутящий момент останется тем же — 400 Н·м. Вновь дети производят равные по величине и противоположные по направлению моменты сил, так что результирующий момент силы равен нулю и качели уравновешены. Отсюда ясно, каким образом малыш, сидящий на краю, может компенсировать вес своей старшей подруги, усевшейся ближе к опоре.

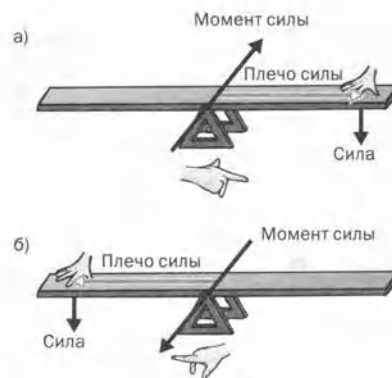


Рис. 2.1.11. Момент силы, действующий на качели, подчиняется правилу правой руки: если вытянуть указательный палец правой руки в направлении плеча силы, а средний палец — в направлении силы, то большой палец укажет направление момента силы.

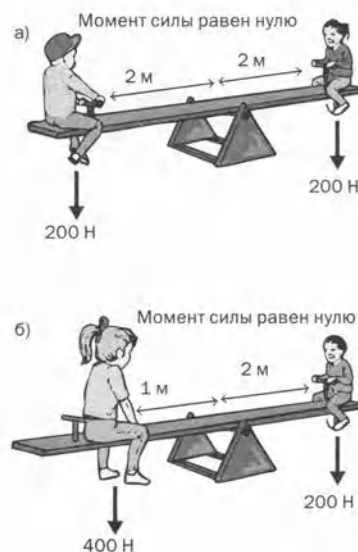


Рис. 2.1.12. (а) Двое детей одинакового веса, усевшись на качели на равном расстоянии от опоры, вызывают одинаковые по модулю, но противоположно направленные моменты сил относительно опоры. Сумма этих моментов сил равна нулю, поэтому на качели действует нулевой крутящий момент. (б) Если один ребенок весит вдвое больше другого, но усядется посередине своей половины доски, качели также будут уравновешены.

Когда качели находятся в состоянии равновесия, никто и ничто не имеет ускорения. На обоих детей действует нулевая результирующая сила; младшего ребенка качели подталкивают вверх с силой 200 Н, старшего — с силой 400 Н. В конечном счете именно вес малыша, равный 200 Н, вызывает силу реакции опоры, равную 400 Н и действующую со стороны качелей на старшую девочку. Маленький ребенок с помощью качелей получает выигрыш в силе и может поднять и удержать свою более крупную и гораздо более тяжелую подружку. Однако расстояние, на которое будет перемещаться при качании маленький мальчик, будет вдвое больше.

Именно это и необходимо для того, чтобы работа, совершаемая маленьким ребенком над качелями, равнялась работе, совершаемой качелями над подростком. Это пример выигрыша в силе за счет рычага — малая сила, приложенная к одной части вращающейся системы на большом расстоянии от опоры, порождает большую силу, приложенную в другой части системы на малом расстоянии от опоры.

## Покачаемся!

Качели на рис. 2.1.12 уравновешены в обоих случаях, а это значит, что результирующий крутящий момент равен нулю. Хотя оба ребенка своим весом производят моменты сил, действующие на качели, в сумме эти моменты дают нуль. Раз на качели действует нулевой результирующий момент силы и углового ускорения не возникает, качели непрерывно вращаются с постоянной угловой скоростью.

Однако уравновешенные в своем нынешнем состоянии качели либо останутся неподвижными, либо будут вращаться бесконечно долго в одном и том же направлении. Едва ли дети способны замереть навечно, а при непрерывном вращении в одном и том же направлении они должны будут периодически переворачиваться вверх тормашками. Мы явно что-то упустили из виду.

Что делают дети, когда качели не двигаются? Для того чтобы привести качели в движение, их нужно вывести из состояния равновесия. Один из детей должен изменить момент силы, с которым он действует на качели. Девочка может изменить или направленную вниз силу, приложенную к качелям с ее стороны, или расстояние от точки приложения силы до опоры. И в реальной жизни дети очень часто меняют и силу, и плечо силы, даже не задумываясь об этом. Если ребенок наклонится вперед к опоре, то плечо силы уменьшится и крутящий момент, производимый этим ребенком, также станет меньше; в результате его сторона качелей поднимется вверх, подняв и ребенка. Если же кто-то из детей оттолкнется ногами от земли, земля ответит силой, приложенной к ногам ребенка, направленной вверх и уменьшающей силу и момент силы, с которыми ребенок воздействовал на качели; и вновь качели начнут вращаться, а ребенок поднимется.

Итак, наклонившись вперед или оттолкнувшись от земли, ребенок заставляет неподвижные, уравновешенные качели начать вращение. Точно так же, когда край качелей ударится о землю, земля отреагирует большой, направленной вверх силой реакции опоры. Поскольку эта сила приложена далеко от оси вращения и направлена почти перпендикулярно своему плечу, она порождает значительный крутящий момент, действующий на качели, и вращение резко прекращается. Угловое ускорение настолько велико, что ребенок наверняка почувствует сильный удар, и, зная это, он постарается заранее упереться ногами в землю, чтобы смягчить этот удар. Затем ребенок снова оттолкнется от земли, и качели начнут вращаться в обратном направлении. Один ребенок поднимется, а другой опустится. Когда противоположный край доски коснется земли, цикл повторится.

Качаясь, дети постоянно меняют действующие на качели моменты сил, направляя их в противоположные стороны. В ту минуту, когда ребенок отталкивается от земли и наклоняется вперед или назад, чтобы раскатать качели, последние выходят из состояния равновесия. Угловое ускорение уравновешенных качелей равно нулю, а изменить угловую скорость качелей дети могут, лишь разбалансировав систему.

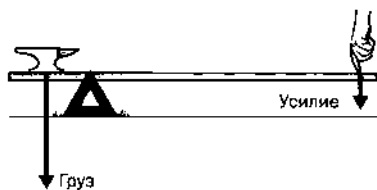


Рис. 2.1.13. Рычаг поворачивается на опоре, расположенной посередине, так что когда вы нажимаете на правый конец (прикладываете к нему рабочее усилие), а груз давит на левый, то устанавливается равновесие. Поскольку груз воздействует на плечо рычага ближе к точке опоры, чем ваша рука, рычаг уравновешивается при усилии намного меньшем, чем вес груза.

Маленький ребенок способен поднять на качелях гораздо более тяжелого сверстника, если тот сядет ближе к опоре. Младший ребенок на **рис. 2.1.12, б** весит вдвое меньше старшего, но бывают и более разительные контрасты. Если же более тяжелый ребенок придвинется совсем близко к опоре, его можно будет поднять, приложив к другому концу качелей совсем небольшое усилие.

Именно так работают различные рычаги — лом, монтировка или гвоздодер. Если вам предстоит поднять тяжелый предмет, то следует расположить опору близко к одному из концов рычага (**рис. 2.1.13**). Если вы приложите к длинному концу направленную вниз силу средней величины (рабочее усилие), а предмет, который вы поднимаете, действует на короткий конец с очень большой, направленной вниз силой (груз), рычаг приходит в равновесие и вращается с постоянной угловой скоростью относительно точки опоры.

Две эти силы вызывают равновеликие и противоположно направленные крутящие моменты, но из-за того, что груз расположен намного ближе к точке опоры, она должна быть намного больше рабочего усилия. В то время как вы и ваш конец рычага давите друг на друга с незначительной силой, нагрузка и короткий конец рычага обмениваются весьма большими силами. Вот почему так просто вытащить гвоздодером вбитый в доску гвоздь, а монтировкой можно запросто приподнять угол тяжелого шкафа.

Рычаг дает вам выигрыш в силе и наглядно демонстрирует связь силы и расстояния. Вы не избавляетесь от необходимости поднимать тяжелые предметы, но можете сделать это с меньшими затратами силы, приложенной на удалении от точки опоры.

Принцип рычага с опорой посередине используется во многих инструментах, в частности в ножницах (**рис. 12.1.14**). Лезвия ножниц поворачиваются вокруг центральной точки вращения под воздействием противоположно направленных моментов сил, причем один из них производите вы, а другой — лист бумаги, который вы режете. Край бумаги расположен очень близко к точке вращения, поэтому, чтобы уравновесить производимый вами момент силы и не дать вам сдвинуть лезвия, со стороны листа бумаги — даже при самом легком сжатии ручек ножниц — должна быть приложена очень большая сила. Естественно, бумага поддается, и лезвия ножниц разрезают ее. Таков же принципы работы садовых ножниц, ножниц по металлу, болтореза, канцелярского дырокола и кусачек.

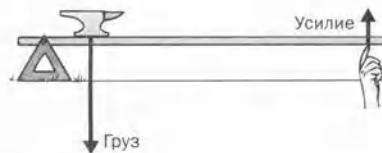
Еще один пример использования рычага для подъема тяжестей — это тачка (**рис. 2.1.15**). В данном случае точка опоры расположена на одном краю рычага, над колесом, а вы поднимаете другой его конец, прикладывая усилие. Со стороны тачки и ее содержимого (груза) ближе к середине рычага действует сила, направленная вниз, но поскольку эта сила приложена гораздо ближе к точке опоры, чем ваша сила, то моменты сил компенсируются и тачка уравнивается, даже если груз многократно превышает усилие. Поэтому с помощью тачки можно перевозить весьма тяжелые грузы, избежав нерациональной траты энергии.

Тот же принцип, что и в работе тачки, используется и в других приспособлениях, например в прессе для чеснока (**рис. 2.1.16**). Когда вы сжимаете ручки пресса, зубчики чеснока стремятся противостоять вашему действию. Чеснок расположен ближе к точке опоры, поэтому компенсировать даже небольшой момент силы, направленной на сжатие ручек пресса, он смог бы, только приложив большую силу, направленную на размыкание ручек. Несмотря на отчаянное сопротивление, чеснок будет раздавлен и выпустит сок. Подобным образом устроены также щипцы для орехов, консервные открывалки и соковыжималки.

Даже гаечный ключ и отвертка работают по принципу рычага, точка опоры которого находится на его конце. Точкой опоры, вокруг которой все вращается, служит продольная ось болта или шурупа; в то время как вы и инструмент воздействуете друг на друга с небольшими силами, приложенными далеко от точки опоры, инструмент и болт производят большие взаимные усилия, приложенные гораздо ближе к этой точке. При увеличении длины рычага (плеча силы) момент силы, действующий на болт или винт, возрастает, поэтому длинные гаечные ключи более эффективны, а отверткой работать удобнее, если у нее толстая рукоятка.



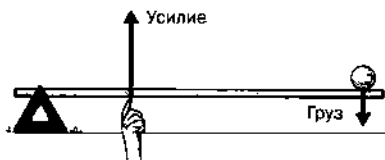
**Рис. 2.1.14.** Сдвигая кольца ножниц, вы производите моменты сил, под действием которых лезвия смыкаются и режут бумагу. Бумага стремится раздвинуть лезвия за счет моментов сил, “разводящих” лезвия. Если вы приложите достаточно большое усилие, “сдвигающие” моменты сил возобладают над “разводящими”. В результате лезвия ножниц приобретут угловое ускорение, начнут поворачиваться, сомкнутся и разрежут лист бумаги.



**Рис. 2.1.15.** Точка опоры рычага расположена ближе к его левому концу, поэтому рычаг уравнивается, когда вы прикладываете к его правому концу направленную вверх силу (усилие), а груз давит на него между вашей рукой и опорой. Поскольку сила со стороны груза приложена ближе к точке опоры, чем поднимающая сила, рычаг уравнивается даже при усилении намного меньшем, чем вес груза.



**Рис. 2.1.16.** Сжатие ручек пресса для чеснока приводит к тому, что они поворачиваются вокруг точки опоры, расположенной на их левом конце. Чеснок в ситечке не может противостоять таким силам давления и продавливается сквозь дырочки, превращаясь в истекающую соком мякоть.



**Рис. 2.1.17.** Рычаг поворачивается вокруг точки опоры, расположенной на левом конце, и уравнивается, когда вы прикладываете большую, направленную вверх силу (усилие) посередине, а шар (груз) давит на правый конец рычага. Поскольку ваше усилие приложено гораздо ближе к точке опоры, чем сила со стороны груза, рычаг уравнивается в том случае, если усилие будет намного больше веса груза. Если рычаг начнет подниматься (поворачиваться против часовой стрелки), то та его часть, где приложено усилие, приподнимется лишь ненамного, а конец с грузом переместится вверх на значительное расстояние.

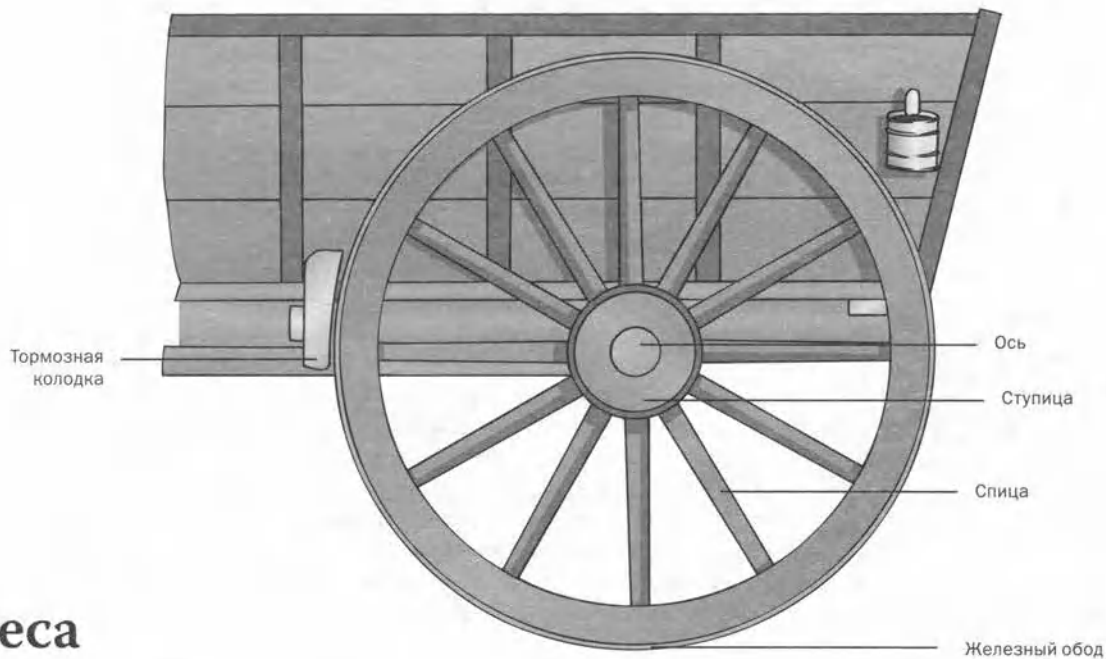
Гаечный ключ может быть снабжен торсиомером — измерителем момента силы, действующего на гайку или головку болта. Торсионный ключ позволяет правильно затянуть болт — так, чтобы крепление было достаточно надежным, но в то же время конструкция не деформировалась бы из-за недостаточного или чрезмерного напряжения.

Мы вроде бы рассмотрели все возможные варианты рычагов — с точкой опоры в центре и на краю. А что, если сила приложена где-то посередине между грузом и точкой опоры? Казалось бы, рычаг, изображенный на рис. 2.1.17, совершенно бесполезен, потому что вам приходится прикладывать более значительное усилие, чем та сила, с которой рычаг действует на груз. Но подумайте хорошенько, на сколько вы поднимаете рычаг и на сколько поднимается груз. Такой рычаг нужен тогда, когда важно не просто поднять тяжелый предмет, а переместить его на значительное расстояние.

Рычаг этого рода вы используете, когда подметаете пол или моете его с помощью швабры, а также когда работаете граблями. Дело не в том, что вам не хватит сил повозить по полу коротким веником или тряпкой или собрать листья граблями без рукоятки, — просто вам не хочется совершать слишком уж энергичные движения руками. К тому же придется опуститься на четвереньки, а это уж совсем неприятно. Вот вы и используете рычаг, который позволяет вам за счет коротких, но достаточно энергичных движений рук (они служат и точкой опоры, и источником входящей силы) без больших усилий перемещать метлу, швабру и грабли на большее расстояние.

Рычаг с входящей силой, приложенной посередине, увеличивает не только перемещение, но и скорость. Его конец движется быстрее той части, которую вы толкаете, и благодаря такому эффекту можно запустить в воздух мелкий предмет с более высокой скоростью, чем скорость движения руки. Как бы вы ни старались, вам не удастся бросить предмет со стартовой скоростью выше 160 км/ч, потому что ваша рука не способна двигаться быстрее. Но вы запросто заставите кончик рычага перемещаться вдвое быстрее и можете воспользоваться этим при броске. Будучи ребенком, я отлично развлекался у бабушки с дедушкой, занимаясь метанием яблок, подобранных в саду, с помощью длинной упругой палки. Без оружия я никуда не годился. Зато с помощью палки я мог увеличить скорость полета яблока в два-три раза и ощутить себя настоящей звездой бейсбола.





## 2.2 Колеса

Колесо — нехитрое приспособление, однако оно, так же как и пандусы с рычагами, здорово облегчает нам жизнь. Впрочем, мы используем колеса главным образом не ради выигрыша в силе, а ради преодоления силы трения. До сих пор мы пренебрегали трением и рассматривали действие законов механики в идеальных условиях. Однако в реальной жизни трение существует, и из-за него движущиеся тела, как правило, стремятся замедлить ход до полной остановки. Таким образом, в этом разделе нам предстоит прежде всего понять природу сил трения — хотя на этом этапе мы по-прежнему не будем учитывать сопротивление воздуха.

### Доставка картотечного шкафчика; трение

В разделе 1.3 мы прикидывали, как бы занести рояль в новую квартиру вашей приятельницы, но при расчетах сознательно игнорировали хорошо знакомое нам явление — трение. К счастью для нас, ножки рояля снабжены колесиками, которые уменьшают эффект трения и тем самым облегчают передвижение рояля. В этом разделе мы сосредоточим все внимание на колесах. Но чтобы понять, как связаны колеса с трением, давайте для начала передвинем кое-какую мебель — например, шкафчик, в котором ваша подружка держит ноты.

Шкаф с ящиками стоит на ровном, гладком паркете из твердой древесины; он буквально набит нотами и весит около 1000 Н. Вам известно, что, несмотря на свою немалую массу, он приобретет ускорение, если к нему приложить силу в горизонтальном направлении, поэтому вы пытаетесь слегка подтолкнуть его к двери. Никакого результата. И это понятно: ведь ускорение шкафа будет вызвано не какой-то одной силой, а результирующей всех приложенных к нему сил. По-видимому, существует еще какая-то сила, воздействующая на шкаф в таком направлении, что ей удастся компенсировать вашу силу и воспрепятствовать движению шкафа. Но вас это не смущает — вы толкаете шкаф все сильнее и сильнее, пока вам, наконец, неимоверным усилием не удастся сдвинуть его с места. Однако шкаф все равно двигается еле-еле, хотя вы не прекращаете изо всех сил его толкать. Что-то еще явно воздействует на шкаф и пытается его остановить!

Ваш противник — трение, феномен, который препятствует взаимному смещению соприкасающихся поверхностей. Две перемещающиеся относительно друг друга поверхности движутся с разными скоростями, и человек, который стоит на одной из них, видит, что движется другая поверхность. В отличие от относительного перемещения, трение порождает силы, приложенные к обеим поверхностям в противоположных направлениях, так что тела стремятся начать движение с одинаковой скоростью.



Рис. 2.2.1. Шкафчик с нотами скользит по полу влево, но испытывает действие силы трения, направленной вправо, из-за чего в конце концов останавливается.

Скажем, если мы пытаемся переместить шкаф по полу налево, пол отвечает силой трения, направленной вправо вдоль своей поверхности (рис. 2.2.1). На шкаф действует сила трения, направленная вправо — против вектора скорости шкафа, направленного влево. Раз ускорение шкафа направлено против скорости, шкаф начинает двигаться медленнее и останавливается.

Согласно третьему закону Ньютона, со стороны шкафа на пол должна действовать равновеликая и противоположно направленная сила. Так и есть — шкаф воздействует на пол с силой трения, направленной влево. Однако пол, будучи частью конструкции здания, накрепко связан с земной поверхностью, поэтому его ускорение очень мало. Ускорение почти полностью приходится на долю шкафа, и вскоре два объекта начинают перемещаться с одинаковыми скоростями.

Действие сил трения всегда направлено против относительного перемещения, но эти силы существенно различаются по интенсивности в зависимости (1) от плотности контакта поверхностей, (2) от степени их гладкости и (3) от того, движутся ли соприкасающиеся поверхности относительно друг друга. Во-первых, чем плотнее прижата одна поверхность к другой, тем больше будет сила трения. Скажем, пустой шкаф скользит по полу легче, чем шкаф, забитый нотами. Во-вторых, на шершавой поверхности трение увеличивается, а на очень гладкой или покрытой смазочным материалом оно существенно меньше. Кататься на санках по снежной или ледяной горке куда веселее, чем по асфальтовой. Третье же условие мы рассмотрим позднее.

## Трение на микроскопическом уровне

Когда мы толкнули шкаф и он заскользил по полу, на него начала действовать горизонтально направленная сила трения, которая будет постепенно останавливать шкаф. Но откуда берется эта сила? Из приложенных к шкафу сил нам скорее вспомнятся не горизонтальные, а вертикальные — направленный вниз вес и направленная вверх сила реакции опоры. Как возникает горизонтальная сила, действующая на шкаф со стороны пола?

Дело в том, что и дно шкафа, и поверхность пола далеко не безупречно гладкие. На них имеются всевозможные более или менее заметные выступы и впадинки. И в действительности шкаф опирается на пол не одной гладкой поверхностью, а множеством крошечных поверхностей (рис. 2.2.2). Когда шкаф движется по полу, микроскопические выступы на его нижней стороне сталкиваются с такими же микроскопическими выступами на поверхности пола. При каждом контакте этих выступов возникают горизонтально направленные силы. Маленькие силы препятствуют относительному перемещению и вносят свой вклад в общую силу трения, действующую на пол и на шкаф. Даже поверхности, которые выглядят зеркально гладкими, имеют микроскопические неровности, поэтому при их трении друг о друга возникают силы сопротивления.

На более грубой поверхности таких маленьких выступов больше, да и сами они крупнее, поэтому трение более сильное. Если подложить под шкаф наждачную бумагу, то сила трения при его движении по полу будет больше, чем была без бумаги. С другой стороны, идеально гладкое покрытие — вроде того, что используется в современной “непригорающей” посуде, — позволит шкафу скользить более легко и плавно.

Можно увеличить число точек контакта, плотнее прижав друг к другу поверхности двух тел, и трение также станет сильнее (в зоне контакта окажется больше микроскопических выступов, и они будут соприкасаться чаще). Вот почему шкаф, полный нот, сдвинуть тяжелее. Увеличив вес шкафа вдвое, вы примерно вдвое увеличите и количество точек контакта, и двигать шкаф по полу будет тоже вдвое труднее. Здесь работает эмпирическое правило: силы трения между поверхностями пропорциональны силам, которые прижимают их друг к другу.

Кроме того, трение приводит к износу поверхности, так как при трении повреждаются зоны контакта поверхностей. Со временем подобный износ становится все более заметным: даже, казалось бы, несокрушимо твердые ступени стираются под множеством протопавших по ним подошв. Самый простой способ уменьшить износ — помимо применения смазочных веществ — это отполировать поверхности до максимально возможной гладкости. Гладкие поверхности также соприкасаются в выступающих точках и при скольжении друг по другу

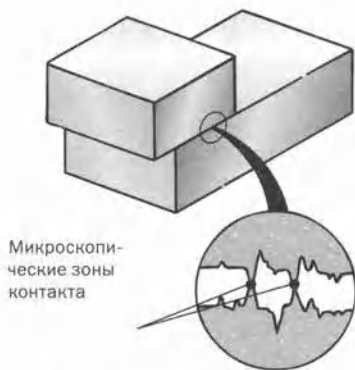


Рис. 2.2.2. Прижатые друг к другу поверхности на самом деле соприкасаются только в отдельных точках контакта. При скольжении поверхностей выступы сталкиваются, что порождает трение и износ.

также подвергаются воздействию трения, но зоны контакта у них более обширные и края выступающих точек более обтекаемые, поэтому поверхности меньше повреждаются при соударении.

## Трение покоя, трение скольжения и сила сцепления

---

В действительности существуют два рода трения — трение скольжения и трение покоя. Действие трения скольжения направлено на прекращение движения двух поверхностей друг по другу, если таковое имеет место. Но даже если скорости перемещения контактирующих поверхностей равны, основной фактор, который мешает им начать скользить друг по другу, — это трение покоя.

Оказывается, не так-то легко протащить шкаф по полу. В точках контакта поверхности шкафа и пола сильно прижаты друг к другу, так что слабый толчок ничего не даст. Трение покоя неизменно порождает силу трения, которая полностью гасит ваш толчок. И поскольку результирующая сила, действующая на шкаф, равна нулю, ускорения не возникает.

Впрочем, сила, вызванная трением покоя, имеет свой предел. Чтобы сдвинуть шкаф с места, вы должны просто достаточно энергично надавить на него и тем самым приложить к шкафу более значительную силу в горизонтальном направлении, чем та, что приложена к нему из-за трения покоя и направлена в противоположную сторону. Тогда на шкаф будет действовать результирующая сила, отличная от нуля, и он приобретет ускорение.

Как только шкаф начинает двигаться, вместо трения покоя возникает трение скольжения. Действие трения скольжения направлено на остановку движущегося тела, поэтому вам придется постоянно толкать шкаф, чтобы он продолжал двигаться. В процессе скольжения шкафа по полу точки соприкосновения поверхностей не успевают плотно прижаться друг к другу, и горизонтальные силы уменьшаются. По этой причине сила трения скольжения обычно бывает меньше силы трения покоя, и чтобы двигать шкаф, который уже находится в движении, требуется меньшее усилие, чем для того, чтобы сдвинуть его с места.

Трение обоих родов вписывается в концепцию силы сцепления — самой большой силы трения, которая может быть приложена к шкафу со стороны пола в данный момент времени. Пока шкаф стоит, его сцепление равно максимальной силе, которую способен произвести трение покоя. Но стоит шкафу начать движение, как сила сцепления уменьшается до величины силы трения скольжения.

В случае со шкафом сила сцепления — это досадная помеха, зато сцепление обуви с полом играет важнейшую роль. И когда вы толкаете шкаф, ваша обувь должна надежно сцепляться с поверхностью пола, чтобы обеспечить необходимую горизонтальную силу. Будем надеяться, что на ногах у вас — ботинки *Dr. Martens!*

## Работа, энергия и мощность

---

Трение покоя принципиально отличается от трения скольжения еще и тем, что последнее приводит к потере энергии. Энергия не может совсем исчезнуть из-за трения скольжения — мы уже знаем, что это сохраняющаяся величина, которая не может ни внезапно возникнуть, ни вдруг куда-то пропасть. Но энергия может передаваться от одного тела другому и переходить из одной формы в другую. Трение скольжения — это причина перехода полезной энергии упорядоченных процессов, которую можно было бы использовать для совершения работы, в относительно бесполезную, неупорядоченную форму. Такая неупорядоченная энергия называется тепловой энергией, мы связываем ее с температурой. Ее называют также внутренней энергией или теплотой. Из-за трения скольжения работа переходит в тепловую энергию, и тела разогреваются.

В разделе 1.3 мы выяснили, что энергия — это способность системы совершать работу и что энергия передается от одного тела к другому в процессе совершения этой работы. Кроме того, может меняться вид энергии — движущиеся тела обладают кинетической энергией, а силы внутренних и внешних взаимодействий тел обуславливают наличие у них потенциальной энергии. Можно научиться “отслеживать” переход одного вида энергии в другой, подобно тому как бухгалтер отслеживает движение финансовых потоков в своей компании.

Кинетическая энергия, она же энергия движения, — наиболее понятная форма энергии. Вы можете проследить за тем, как тело получает и теряет кинетическую энергию. Когда кинетическая энергия теряется, тело останавливается; так вода, только что провернувшая мельничное колесо, замедляется в омуте после мельницы, так останавливается шар в боулинге, ударившись о кегли. И наоборот, получая кинетическую энергию, тело движется быстрее. Если вы ударите битой по бейсбольному мячу, он полетит быстрее; вы передаете мячу энергию своего организма, а движущийся мяч получает кинетическую энергию.

Потенциальная энергия запасается при действии сил взаимодействия между телами и внутренних взаимодействий в самих телах. Она проявляется в разных формах — некоторые примеры приведены в таблице 2.2.1. Ни в одном случае движения нет, но тела обладают потенциальной энергией, поскольку сохраняют способность совершать работу.

**Таблица 2.2.1** Некоторые формы и примеры тел и систем, обладающих потенциальной энергией

Форма потенциальной энергии	Пример
Потенциальная энергия, обусловленная силами тяготения	Шар для боулинга на вершине холма
Потенциальная энергия, обусловленная упругостью	Пружина заведенных часов
Электростатическая потенциальная энергия	Грозовая туча
Химическая потенциальная энергия	Фейерверк, петарда
Ядерная потенциальная энергия	Уран

Единиц измерения энергии существует множество, достаточно назвать джоуль (Дж), калории, килокалории (последние обычно характеризуют питательную ценность продуктов), а также киловатт-час. Все они показывают одно и то же, а отличаются друг друга только численно — коэффициенты пересчета приведены в Приложении В. Например, 1 килокалория (пищевая калория) равноценна 1000 калориям или 4187 Дж. То есть пончик с джемом содержит около 250 килокалорий и дает вам приблизительно 1 000 000 Дж. Джоуль — это то же самое, что ньютон-метр, а энергии 1 000 000 Дж вам хватит на то, чтобы 200 раз затащить рояль вашей подруги на второй этаж (1000 Н, умноженные на 5 м высоты, дают 5000 Дж работы за один подход). Неудивительно, что пончики с джемом плохо сказываются на вашей фигуре!

Конечно, рано или поздно вы израсходуете полученную с пончиком энергию — это вопрос времени. Но для этого вам придется немало поработать. Мерой работы служит мощность — количество работы, совершаемой за определенный промежуток времени:

$$\text{мощность} = \frac{\text{работа}}{\text{время}}$$

В международной системе единиц мощность измеряется в джоулях в секунду, или ваттах (сокращенно Вт). Другие единицы измерения мощности — калории в час и лошадиные силы; как и единицы измерения энергии, единицы мощности различаются количественно, что также показано в Приложении В. Скажем, 1 лошадиная сила равна 745,7 Вт. Двигатель мощностью в 1 лошадиную силу за 1 секунду совершает работу 745,7 Дж, а для подъема рояля на второй этаж требуется совершить работу 5000 Дж — стало быть, двигатель справится с этой задачей за 6,7 секунды.

## Трение и тепловая энергия

Что можно сказать о тепловой энергии, которая вырабатывается при трении скольжения? Это какая-то новая форма потенциальной энергии? Или разновидность кинетической?

На самом деле ни то ни другое. Тепловая энергия — это сочетание кинетической и потенциальной энергии. Но, в отличие от кинетической энергии брошенного мяча и потенциальной энергии водруженного на пандус рояля, кинетическая и потенциальная энергии, составляющие тепловую энергию, не упорядочены на атомном и молекулярном уровне. Тепловая энергия заставляет микроскопиче-

ские частицы вещества совершать хаотические перемещения; каждая частица в любой момент времени обладает собственным запасом потенциальной и кинетической энергии, а совокупность этих распределенных в массе вещества энергий и есть тепловая энергия.

Толкая шкаф по полу, вы совершаете над ним работу, но его скорость не увеличивается. Вместо этого трение скольжения вызывает превращение совершаемой вами работы в тепловую энергию, и по мере того как энергия, которую шкаф от вас получает, распределяется по его частицам, шкаф нагревается. Однако, несмотря на эту легкость перехода работы в тепловую энергию, перевести тепловую энергию обратно в работу не так-то просто. Неупорядоченность не только затрудняет действия с телами, но и не позволяет исправить последствия этих действий. Если вы уроните любимую чашку и разобьете ее на мелкие кусочки, чашка никуда не денется, но приобретет неупорядоченную форму, и толка от нее уже не будет. Сколько бы вы ни пытались снова и снова собрать в кучку осколки, чашка вряд ли восстановит прежнюю форму. Так же и энергию, которая уже перешла в тепловую, крайне сложно вновь направить в полезное русло.

Трение скольжения неизбежно вызывает переход хотя бы части работы в тепловую энергию. Поскольку на скользящие одна по другой поверхности действуют силы трения, которые препятствуют их относительному смещению, трение скольжения совершает над ними отрицательную работу; оно забирает у движущегося тела энергию и превращает ее в тепловую. Следовательно, вы совершаете над шкафом работу, толкая его по полу, а сила трения скольжения совершает над ним отрицательную работу. Кинетическая энергия шкафа существенно не меняется, зато тепловая возрастает.

Трение покоя, напротив, не переводит работу в тепловую энергию. Раз поверхности, испытывающие действие сил трения покоя, не движутся относительно друг друга, значит, перемещения нет и работа не совершается. Можно весь день напролет упираться руками в шкаф и не совершить никакой работы. Даже если вы приподнимете шкаф на руках — а это очень тяжело, — трение покоя, возникающее между вашими ладонями и стенками шкафа, вряд ли поможет вам совершить работу над самим шкафом. Когда вы поднимете шкаф, вся совершенная вами работа пойдет на увеличение его потенциальной энергии.

## Колесо

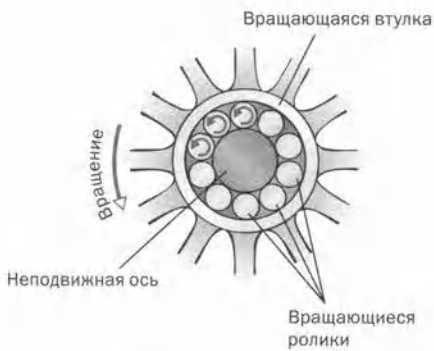
Итак, вам каким-то образом удалось вытащить шкаф с ногами из старой квартиры вашей приятельницы, и теперь вы толкаете его по тротуару. Всю дорогу вы совершаете работу, направленную на преодоление трения скольжения, и производите огромное количество тепловой энергии, передавая ее нижней поверхности шкафа и дорожному покрытию. Да при этом еще и портите их, потому что трение скольжения приводит к износу поверхности. К тому времени, как вы доберетесь до нового места жительства вашей подруги, вы рискуете напроочь стереть нижний ящик шкафа!

К счастью, существуют механические системы, которые помогают нам передвигать один предмет по поверхности другого так, чтобы не возникало никакого трения — ни покоя, ни скольжения. Классический пример — опорные катки (рис. 2.2.3). Если поставить шкаф на катки, то они будут катиться в процессе перемещения шкафа, при этом их поверхность не будет скользить ни по дну шкафа, ни по тротуару. Чтобы почувствовать, как работает опорный каток, сожмите руку в кулак и прокатите им по ладони другой руки. Кожа одной руки не трется о кожу другой; и поскольку это бесшумное движение не вызывает превращения работы в тепловую энергию, кожа остается прохладной. Теперь потрите ладони одна об другую — трение скольжения разогреет кожу.

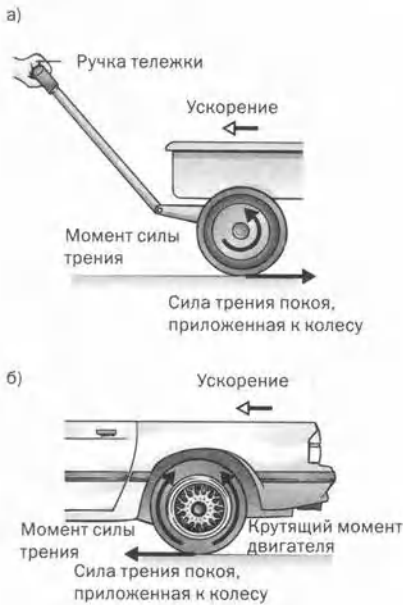
Хотя трение скольжения при контакте катков с нижней поверхностью шкафа отсутствует, сила трения покоя на них действует. Точка наверху катка соприкасается с точкой на нижней поверхности шкафа, и эти две точки будут прочно сцеплены трением покоя до тех пор, пока вращение катков не разъединит их. Такое же взаимодействие происходит между катком и тротуаром; трение покоя вызывает момент силы, который действует на катки, и это главная их движущая сила. Опять-таки вы можете проверить это на себе. Попробуйте провести кулаком по



Рис. 2.2.3. (а) Шкаф, под который подложены катки (валики), испытывает действие только силы трения покоя. (б) Поскольку верхняя поверхность каждого катка перемещается вперед вместе со шкафом, в то время как нижняя поверхность остается позади на тротуаре, центр масс катка движется вдвое медленнее шкафа. В результате валики один за другим выкатываются сзади из-под шкафа.



**Рис. 2.2.5.** В роликовом подшипнике ступица не соприкасается непосредственно с осью. Эти две детали разделены роликами, которые вместе с втулкой вращаются вокруг оси. Большая часть нагрузки приходится на несколько нижних роликов, так как втулка подпирает их снизу, а они подпирают ось. При вращении колеса ролики меняются местами, поочередно прокручиваясь вправо и вверх, а затем — вниз и влево, чтобы вновь принять на себя нагрузку. Ролики, колесо и ось испытывают только воздействие трения покоя, но не трения скольжения. В шарикоподшипнике вместо цилиндрических роликов используются сферические шарики.



**Рис. 2.2.6.** (а) Когда ручная тележка начинает двигаться вперед с ускорением, действующее со стороны дороги трение покоя создает моменты сил, благодаря чему колеса вращаются. (б) Когда колеса автомобиля приводятся в движение двигателем, трение покоя, действующее со стороны дорожного покрытия, толкает машину вперед и создает моменты сил, направленные против вращения колес.

раскрытой ладони. В тот момент, когда кулак вот-вот начнет скользить, вы ощутите действие момента силы. Трение покоя между вашими руками, препятствуя скольжению, заставляет кулак поворачиваться, словно опорный каток.

Поставив шкаф на опорные катки и сдвинув его с места, вы сможете катить его по дороге сколь угодно долго. При условии, что трение качения и скольжения отсутствует, шкаф не расходует кинетическую энергию и потому может двигаться с постоянной скоростью без вашей помощи. Но по мере продвижения катки один за другим выкатываются назад из-под шкафа, и вам приходится то и дело снова перекладывать вперед выкатившийся сзади каток. Вам нужно иметь по меньшей мере три катка, иначе шкаф упадет, как только задний каток выкатится из-под него. Действия трения скольжения катки не испытывают, зато у вас появилась новая головная боль — и перспектива длительной прогулки в подобных условиях вас совершенно не привлекает. Не существует ли еще какого-нибудь приспособления, которое могло бы избавить вас от трения скольжения и при этом не требует предельной сосредоточенности?

Один из вариантов — четырехколесная повозка. Простейшая повозка состоит из корпуса, стоящего на прикрепленных к нему неподвижных осях, которые проходят через центральные ступицы (втулки) четырех колес (**рис. 2.2.4**). К колесам приложены направленные вверх силы реакции опоры со стороны земли, к осям — направленные вверх силы реакции опоры со стороны колес, а оси поддерживают повозку и ее груз. Когда повозка едет, колеса вращаются так, что их нижние поверхности не проскальзывают и не буксуют на земле — напротив, какая-то область внешней поверхности каждого колеса (обода) вдавливается в дорожное покрытие, на мгновение останавливается (в этот момент возникает трение покоя), затем снова отрывается от дороги, поднимается, и следующая область поверхности обода занимает место предыдущей. Благодаря поочередным касаниям и отрывам между каждой точкой обода и дорогой возникает только трение покоя.



**Рис. 2.2.4.** Повозка едет влево, и колеса крутятся против часовой стрелки. На внешний обод колеса действует только сила трения покоя, но ступица скользит вокруг оси и превращает кинетическую энергию телеги в тепловую. Чтобы снизить потери энергии, диаметр ступиц делают по возможности небольшим, а оси смазывают машинным маслом.

Проблема в том, что при вращении колеса его ступица постоянно трется об ось. Из-за трения скольжения теряется энергия, а ступица и ось изнашиваются. Конечно, диаметр ступицы не так уж велик, и поэтому она вращается вокруг оси относительно медленно, так что совершаемая ею работа — и, соответственно, износ — тоже не слишком значительны. Тем не менее трение скольжения желательно уменьшить, и это можно сделать, покрыв ступицу и ось специальной смазкой для колес (раньше ее называли колесной мазью).

Но еще лучше вставить между ступицей и осью ролики (**рис. 2.2.5**), чтобы получился роликовый подшипник. Это механическое устройство, состоящее из двух колец, разделенных роликами, которые не дают кольцам тереться друг о друга. Внутреннее кольцо можно закрепить вокруг неподвижной оси, а внешнее приладить к вращающейся ступице. Когда ручная тележка трогается с места, действующее со стороны дорожного полотна трение покоя создает на колесах моменты сил, и колеса вращаются (**рис. 2.2.6, а**). Переднее колесо велосипеда тоже опирается на неподвижную ось, но в подшипнике используются шарики — это шарикоподшипник (**рис. 2.2.7**).

Ведущее колесо автомобиля также опирается на роликовый подшипник, который, однако, работает иначе. Двигатель должен создавать крутящий момент на ведущем колесе, поэтому каждое ведущее колесо жестко соединено с осью. Двигатель вращает ось, а ось вращает колеса (рис. 2.2.6, б). Внешнее кольцо подшипника крепится к неподвижной раме или кузову автомобиля, а внутреннее — к вращающейся оси.

При вращении ведущего колеса на него действует сила трения покоя со стороны земли, и земля толкает нижнюю точку колеса в горизонтальном направлении, что не дает колесу пробуксовывать. Это единственная горизонтальная сила, приложенная к автомобилю, поэтому он приобретает направленное вперед ускорение.

Пока вы размышляли над всем этим, вам пришла в голову блестящая идея: выгрузите шкафчик на пассажирское сиденье своего красного спортивного кабриолета и заводите мотор. Машина не так послушна, как обычно, — все-таки скрывается большая масса шкафчика, — но все-таки трогается с места с достойным своей марки ускорением. Через несколько мгновений вы катите по улице к новому дому вашей подружки. Не сомневаюсь, что она будет вам весьма признательна!

## Кинетическая энергия

Вы почти приехали — самое время подумать о торможении. Тормоза вашей машины сконструированы так, чтобы она останавливалась за счет перехода кинетической энергии в тепловую. Свою функцию тормоза выполняют следующим образом: неподвижные тормозные колодки трутся о вращающиеся вместе с колесом металлические диски, и трение скольжения переводит один вид энергии в другой. В том, что тормоза справятся с этой задачей, вы не сомневаетесь, но какая часть кинетической энергии превратится при этом в тепловую?

Рассчитать кинетическую энергию автомобиля можно, например, через работу, которую совершает над ним двигатель при разгоне из состояния покоя до определенной скорости. Получается, что кинетическая энергия движущегося автомобиля равна половине произведения его массы на квадрат скорости:

$$\text{кинетическая энергия} = 1/2 \times \text{масса} \times \text{скорость}^2 \quad (2.2.1)$$

Масса машины вместе с вами и шкафчиком составляет примерно 1500 кг. На скорости 100 км/ч ее кинетическая энергия превысит 575 000 Дж. Это огромная величина, она в четыре раза больше, чем если бы автомобиль ехал со скоростью 50 км/ч, поэтому отложите в сторону калькулятор и следите за дорогой. Столь значительный рост кинетической энергии при умеренном повышении скорости объясняет, почему авария на большой скорости гораздо опаснее, чем ДТП на малой, и зачем вон тот полицейский направляет на вашу машину радар. Кстати, красные спортивные автомобили полицейских особенно привлекают.

Впрочем, вы едете спокойно, не превышая разрешенной скорости, и обмениваетесь с полицейским приветственным взмахом руки. Но вскоре вы видите у обочины другую машину, которую, видимо, остановили для проверки. На стоящем позади нее полицейском автомобиле вращается проблесковый маячок, а ведь вращающиеся тела тоже обладают кинетической энергией. Как и кинетическая энергия поступательного движения, кинетическая энергия вращения зависит от инерции и скорости. Но в случае вращающейся мигалки особенно важны момент инерции и скорость вращения. Кинетическая энергия равна половине произведения момента инерции на квадрат угловой скорости:

$$\text{кинетическая энергия} = 1/2 \times \text{момент инерции} \times \text{угловая скорость}^2 \quad (2.2.2)$$

Оформление штрафа закончено, полицейский автомобиль снова вырывает на дорогу, мигалка по-прежнему вращается. Теперь ее кинетическая энергия складывается из двух компонентов — кинетической энергии поступательного движения и кинетической энергии движения вращательного. Первая зависит от скорости центра масс проблескового маячка (она равна скорости движения машины по шоссе). А кинетическая энергия вращательного движения зависит от угловой скорости, с которой маячок вращается вокруг своего центра масс.



Рис. 2.2.7. Вместо цилиндрических роликов, которые используются в роликовых подшипниках, в шарикоподшипнике применяют шарики. Шарики выполняют ту же функцию, что и ролики, но они легче и с ними проще работать, поэтому шарикоподшипники очень удобны, если нет чрезмерных нагрузок — например, в велосипедах и различных бытовых приборах, где есть вращающиеся детали. Однако шарики имеют ряд недостатков. В частности, из-за того что внутри подшипника ось опирается на очень небольшую долю поверхности каждого шарика, при излишней нагрузке они могут деформироваться, и подшипник начнет стирать сам себя. Шарики для подшипников должны быть изготовлены с высочайшей точностью — они должны быть абсолютно одинаковыми и идеально круглыми, — тогда вероятность деформации уменьшается.

Когда полицейская машина скрывается из виду, вам приходит в голову, что у вращающихся колес вашего автомобиля тоже есть кинетическая энергия вращательного движения — существенная прибавка к кинетической энергии поступательного движения. Впрочем, вы все уверены, что тормоза вас не подведут. Через несколько минут вы подъезжаете к дому и нажимаете на педаль тормоза, чтобы остановиться. Вы осознаете, что тяжело нагруженная машина будет терять скорость медленнее, чем обычно, однако тормоза успешно переводят кинетическую энергию в тепловую. Вы добрались до цели, с чем я вас и поздравляю.

## Сила сцепления, пробуксовка и полный привод

Вам повезло — вы взяли помочь приятельнице в теплый, ясный день, и пробуксовка вам не грозит. А если бы погода была плохая и на мостовой образовалась бы гололедица? В таком случае есть реальная опасность, что тяжело нагруженная машина забуксует, когда вы попытаете тронуться. Надо подумать, как лучше всего разместить шкаф в машине.

У вашего спортивного автомобиля привод на задние колеса, то есть двигатель создает крутящий момент только на задних колесах и только им передает энергию. Крутящий момент двигателя заставляет задние колеса вращаться вперед по направлению движения машины, трение покоя со стороны дорожного покрытия создает противоположно направленные моменты сил — именно сила трения толкает машину вперед. Передние колеса, наоборот, пассивно подчиняются движению автомобиля и вращаются под воздействием моментов сил, вызванных трением покоя со стороны дорожного покрытия.

В хорошую погоду сила сцепления шин автомобиля с дорожным полотном достаточно велика. Пока вам не придет в голову выжать до предела педаль газа или изо всех сил ударить по тормозам, одновременно до отказа вывернув руль влево или вправо, асфальт будет действовать на шины с силой трения покоя, достаточной для того, чтобы они не проскальзывали. Но если дорога покрылась слоем льда, менять скорость и направление движения надо очень аккуратно. Если вы попытаетесь слишком резко прибавить скорость на льду — неважно, едете вы по прямой вперед, сдаете назад или поворачиваете, — машину может занести: шины в этой ситуации попросту не имеют сцепления с дорогой, достаточно надежного, чтобы обеспечить требуемое ускорение.

В целом сила сцепления двух поверхностей пропорциональна силам, которые прижимают их друг к другу. В данном случае для одной шины сила сцепления — максимально возможная сила трения покоя — пропорциональна весу, который приходится на нее. Константу, связывающую силу трения покоя и вес, часто называют коэффициентом трения покоя (или статического трения), и зависит она от свойств шины и дорожного покрытия. Для хороших протекторов на сухом дорожном покрытии экспериментально измеренный коэффициент статического трения обычно равен 0,9. На обледеневшей дороге он может упасть до 0,5.

Если уж вы забуксовали, сцепление проскальзывающей шины с дорогой зависит от коэффициента трения скольжения — эта постоянная связывает силу сцепления при проскальзывании и вес. Для протекторов на сухой дороге коэффициент трения скольжения обычно равен 0,8, но на льду может упасть до нуля, потому что из-за тепла, выделяющегося в результате трения скольжения, тонкий верхний слой льда подтаивает и образовавшаяся вода действует как смазка. Короче говоря, если вы забуксуете на льду, вам придется нелегко.

Двигатель вашей машины приводит в движение только задние колеса, и на скользкой дороге вам не удастся быстро набрать скорость, если вы не прижмете их как следует к асфальту. Когда шкаф лежит на переднем сиденье, то часть его веса принимают на себя передние колеса, хотя вы предпочли бы как следует нагрузить задние (ведущие) колеса, чтобы обеспечить максимальное сцепление с дорогой. Лучше погрузите шкаф в багажник — тогда его вес полностью придется на задние колеса, и сцепление их с дорожным покрытием будет сильнее. Зимой, в гололедицу, владельцы автомобилей с задним приводом стараются побольше нагрузить задние колеса.

Однако направление движения вашей машины почти полностью определяют передние колеса, поэтому им тоже необходимо надежное сцепление с дорогой.



Перед вами сложный выбор — если нагрузить заднюю часть машины, то вы сможете быстрее тронуться с места и набрать скорость, но если нагрузить переднюю, то улучшится управляемость. Поэтому на скользкой или обледеневшей дороге лучше ведут себя машины с передним приводом, потому что их передние колеса, отвечающие как за разгон, так и за управляемость, лучше прижаты к дороге (двигатель, самый тяжелый агрегат автомобиля, обычно находится спереди). Еще лучше для сложных погодных условий подходит полноприводный автомобиль, двигатель которого создает крутящие моменты на всех четырех колесах (рис. 2.2.8). У такого автомобиля нет ведомых колес, которые во время движения вперед с ускорением попусту тратят силу сцепления, и он способен быстро разогнаться даже на довольно скользкой дороге.



**Рис. 2.2.8.** Двигатель полноприводного автомобиля (внедорожника) способен создавать крутящие моменты на всех четырех колесах, что позволяет использовать силы статического сцепления для вращения каждого колеса. Кроме того, как и у большинства современных автомобилей, тормоза этого внедорожника снабжены антиблокировочной системой, которая предупреждает проскальзывание шин при торможении. Благодаря этой системе в процессе торможения используются силы статического сцепления, а не более слабые силы сцепления скольжения, возникающие, когда машина пробуксовывает.

---



## 2.3 Аттракцион “Автодром”

В столкновении двух автомобилей нет ничего особенно увлекательного (если не считать боевиков и телевизионных сериалов), однако есть одно приятное исключение — аттракцион “Автодром”. Водители машинок в парке аттракционов лихо гоняют по овальной площадке, то и дело сталкиваясь друг с другом, и чем сильнее удар, тем веселее. Толчки, рывки и крутые виражи составляют суть удовольствия — и при этом без всякого риска сломать себе шею. А в основе этого развлечения, как и множества спортивных игр — от тенниса до бильярда, — лежит несколько фундаментальных физических законов.

### Равномерное и прямолинейное движение: импульс

Бамперные машинки — это небольшие электромобили, открытый кузов которых защищен со всех сторон толстым резиновым бампером. Машинка, которую приводит в действие электромотор, имеет всего два управляющих инструмента — педаль газа и руль. Поскольку сама машинка совсем маленькая, львиная доля общей массы и момента инерции приходится на водителя (а также на пассажира, если вы катаетесь вдвоем).

Представьте себе, что вы только что сели в такую машинку и пристегнули ремень безопасности. Гонка началась!

Машина послушно едет и поворачивает в нужную сторону, и вы быстро начинаете ощущать ее инерцию как при поступательном, так и вращательном движении. При поступательном движении инерция мешает машинке резко тронуться с места и так же резко остановиться, а при поворотах — резко свернуть или прекратить вращение. Мы уже обсуждали оба вида инерции, но давайте еще раз поговорим о них и о том, как они сказываются на поведении вашего электромобиля. Теперь мы увидим, что инерция и момент инерции связаны с двумя новыми сохраняющимися величинами — импульсом и моментом импульса. Я предупреждал, что энергия — не единственная сохраняющаяся величина в природе!

При столкновении на больших скоростях две машинки обмениваются не только энергией. Энергия — не вектор и направления не имеет, а машины, судя по всему, обмениваются какими-то величинами, связанными с движением и имеющими определенное направление. Например, если в вашу машинку врежется

справа под прямым углом другая машина, то вы тоже отклонитесь от курса вправо. Вторая машина сообщит вашей направленный толчок, и эта сохраняющаяся векторная величина называется импульсом.

Импульс (количество движения) — это мера поступательного движения тела, то есть стремления тела двигаться в определенном направлении. Упрощая, можно сказать, что импульс машины указывает, в каком направлении она движется и насколько трудно было заставить машину продолжать двигаться с данной скоростью.

Импульс машины равен произведению ее массы на скорость:

$$\text{импульс} = \text{масса} \times \text{скорость} \quad (2.3.1).$$

Отметим, что импульс — это вектор, направление которого совпадает с направлением скорости. Как и следовало ожидать, чем быстрее едет машинка или чем больше ее масса, тем больше будет импульс, направленный в сторону ее движения. Единица измерения импульса в СИ — килограмм-метр в секунду (кг·м/с).

Физики относятся к сохраняющимся величинам с огромным уважением, потому что эти величины помогают изучать сложные виды движения, в которых иначе не разберешься. Как и всякая сохраняющаяся величина, импульс не может возникнуть ниоткуда и бесследно исчезнуть в никуда. Он может только передаваться от одного тела другому. В движении машинок импульс играет ключевую роль — столкновения для того и нужны, чтобы вы получили удовольствие от передачи импульса. Во время удара импульс переходит от одной машины к другой, в результате чего машинки в одно мгновение меняют скорость или направление движения, а иногда и то и другое вместе. Когда такой обмен импульсами происходит безболезненно, всем очень весело.

Но вот вы остановили свой автомобиль, и теперь его скорость и импульс равны нулю. Для того чтобы снова начать движение, что-то должно сообщить вашей машине импульс. Можно, конечно, просто надавить на педаль и позволить мотору передать автомобилю через колеса импульс от пола, но это не так интересно. Давайте лучше подождем — сейчас в вас на полном газу врежутся вон те два широко ухмыляющихся толстяка в явно перегруженной белой машинке (рис. 2.3.1)!

До столкновения белая машина ехала вправо, и через несколько мгновений после удара ваша поехала в том же направлении, белый же автомобиль резко снизил скорость. Прежде чем вы успеете опомниться от встряски, ваша машинка врежется в автомобиль с каким-то мальчуганом за рулем, толкает его направо и тут же замедляет ход. Цепочку столкновений завершает борт площадки, в который ударяется машина мальчика. Родители ребенка смотрят на вас с явным осуждением, но ничего страшного, никто не пострадал! Итак, направленный вправо импульс перешел от тяжело нагруженной белой машинки вашему автомобилю, затем автомобилю мальчика и борту площадки. Импульс не возник ниоткуда и не рассеялся в воздухе — просто мы все неплохо развлекались, передавая его от машины к машине.



Рис. 2.3.1. Тяжелый белый автомобильчик, импульс которого направлен влево, на высокой скорости толкает вашу машинку. Вы получаете изрядную долю направленного влево импульса. Ваша машина врежется в автомобиль мальчика и передает ему импульс в том же направлении. Машина мальчика врежется в бортик площадки и отдает ему свой направленный влево импульс.

Импульс (количество движения), который передается от машины к машине, называется также импульсом силы, действующей на тело в течение определенного промежутка времени. Двигатель и пол толкают автомобиль в течение нескольких секунд и тем самым передают ему импульс силы. Импульс силы равен изменению количества движения, или произведению силы, приложенной к телу, на длительность ее воздействия:

$$\text{импульс силы} = \text{сила} \times \text{время} \quad (2.3.2).$$

Чем больше сила и чем дольше она действует, тем больше импульс силы и тем интенсивнее обмен количеством движения. Импульс силы — также векторная величина, то есть она имеет направление. Если вы не справились с управлением и полученный от пола импульс силы, действующий в нежелательном направлении, заставляет вас на полной скорости врезаться в бортик, не жалуйтесь потом, что вас не предупредили!

Разные по величине силы, действующие в течение разных промежутков времени, могут сообщить машине одинаковые импульсы:

$$\text{импульс} = \text{большая сила} \times \text{малое время} = \text{малая сила} \times \text{большое время} \quad (2.3.3).$$

Таким образом, ваша машина может получить направленный вперед импульс либо в результате длительного воздействия силы со стороны двигателя и пола, либо после краткого, но мощного столкновения с ударившей вас сзади белой машинкой. Теперь понятно, зачем всем этим автомобилям на площадке такие мягкие резиновые бамперы. Если бы бампер был сделан из твердой стали, то контакт машинок при столкновении длился бы лишь одно мгновение и это привело бы в действие огромную силу. Возможно, в результате вам понадобились бы шейный корсет и услуги адвоката, специализирующегося на несчастных случаях. Но администрация парка аттракционов совершенно не заинтересована в судебных тяжбах и поэтому ограничивает силу возможных ударов: машинки на площадке не только оборудованы упругими бамперами, но и не способны развить слишком большую скорость.

Тем не менее при лобовом столкновении вас может здорово потряхнуть. После лобового удара две машины отлетят одна от другой с противоположно направленными импульсами, причем практически обменяются этими импульсами. Вы только что мчались вперед — и почти мгновенно начинаете ехать назад! Импульс, вызвавший такую перемену в направлении движения, особенно велик — ведь он не только прекратил движение вперед, но и заставил вас поехать назад.

Почему же импульс — сохраняющаяся величина? Потому что работает третий закон Ньютона. Если одна машина воздействует на другую с некой силой в течение какого-то времени, то вторая машина в течение ровно такого же времени действует на первую с точно такой же по величине, но противоположно направленной силой. Поскольку силы равны и направлены навстречу друг другу, столкнувшиеся машинки получают импульсы, равные по модулю, но направленные в противоположные стороны. Так как импульс, полученный одним автомобилем, равен импульсу, потерянному другим, мы говорим, что импульс передается от одной машины другой.

Чем больше масса машины, тем меньше меняется ее скорость в результате передачи импульса. Вот почему белый автомобиль, врезавшись в ваш, не останавливается полностью, хотя скорость вашего увеличилась весьма значительно. Всего лишь малая часть направленного вперед импульса белого автомобиля вызывает существенное изменение скорости вашей машины. Словно насекомое, разбившееся о лобовое стекло автомобиля, вы принимаете на себя львиную долю ускорения.

**Сохраняющаяся величина — импульс (количество движения).**

**Средство передачи — импульс силы**

Импульс (количество движения) — мера поступательного движения тела, то есть способности продолжать движение в том же направлении. Импульс — величина векторная, то есть имеет направление. Он не имеет потенциальной формы и всегда присутствует в явном виде;

$$\text{импульс} = \text{масса} \times \text{скорость.}$$

**Импульс силы** — механическое средство передачи импульса;

$$\text{импульс силы} = \text{сила} \times \text{время.}$$

**Распространенное заблуждение: импульс и сила**

**Заблуждение:** массивное движущееся тело переносит силу — “силу своего импульса”.

**На самом деле:** хотя сила входит в импульс силы, способный передавать количество движения, она не является частью самого количества движения. Движущееся тело переносит не силу, но лишь импульс. Самое важное здесь то, что при равномерном и прямолинейном движении тело не испытывает действия результирующей силы. Но если на его пути встречается препятствие, два тела обмениваются импульсами посредством передачи импульсов силы, и вот эти-то импульсы включают в себя силу.

## Движение по окружности; момент импульса

Если после столкновения две машины начинают вращаться вокруг своей оси, между ними происходит обмен еще одной сохраняющейся величиной. Эта величина — вектор (как и импульс), и связана она с угловой скоростью и направлением вращения вокруг определенной точки. Скажем, когда ваш автомобиль получает скользящий удар сбоку от машинки, которая пыталась объехать вас по часовой стрелке, вы тоже начинаете вращаться — и тоже по часовой стрелке. Вы получили от второй машины некоторую векторную величину, связанную с движением, и эта сохраняющаяся векторная величина называется моментом импульса.

Момент импульса, или момент количества движения, — это мера вращательного движения тела, его способности продолжать вращение вокруг данной оси. Проще говоря, момент импульса вашей машинки указывает направление вращения и то, насколько трудно заставить ее вращаться с данной угловой скоростью. Момент импульса равен моменту инерции, умноженному на угловую скорость:

$$\text{момент импульса} = \text{момент инерции} \times \text{угловая скорость} \quad (2.3.4)$$

Отметим, что момент импульса — это вектор, направление которого совпадает с направлением угловой скорости. Чем быстрее вращается ваш автомобиль и чем больше его момент инерции, тем больше будет его момент импульса, направленный туда же, куда и угловая скорость. Единица измерения момента импульса в СИ — килограмм-метр в квадрате на секунду (сокращенно кг·м<sup>2</sup>/с).

Момент импульса — еще одна сохраняющаяся векторная величина, он не может быть создан или уничтожен, а может только переходить от одного тела к другому. Чтобы ваш автомобиль завертелся на месте, что-то должно сообщить ему момент импульса, и машина будет крутиться, пока не передаст свой момент импульса еще чему-то. Но понять, что такое момент импульса, мы сможем, только если выберем центр вращения. В нашем случае самый подходящий центр вращения — это центр масс машины.

Ваш автомобиль снова стоит, так что его угловая скорость и момент импульса равны нулю, но вдруг черная машинка, проносящаяся мимо, под углом задевает вашу (рис. 2.3.2). Поскольку черная машина двигалась относительно вашей про-

**Рис. 2.3.2.** Черный автомобиль закручивает вашу машинку против часовой стрелки — его момент импульса относительно центра вращения был направлен соответственно. При ударе он передает часть этого момента импульса вашей машине. Эта транзакция привела к тому, что черный автомобильчик перестал вращаться, а ваша машинка начала вращаться против часовой стрелки.



тив часовой стрелки, значит, так же был направлен момент ее импульса относительно центра вращения. При ударе она передала часть этого момента импульса вашей машине, которая тоже начинает вращаться против часовой стрелки. Поскольку черный автомобиль уже потерял какую-то долю своего момента импульса, он продолжает двигаться вокруг вашей машину уже с меньшей скоростью.

По мере того как колеса и трение передают момент импульса площадке автодрома и далее в землю, ваш автомобиль постепенно перестает вращаться. И так, момент импульса не возник и не исчез при столкновении. Он просто был передан от черной машины к вашей, а затем ушел в пол площадки.

## Скользкий удар; момент импульса силы

Момент импульса передается машине посредством момента импульса силы, то есть момента силы, действующего в течение определенного времени. За краткий миг удара (то есть момент силы действовал очень недолго), черный автомобиль передал вашему момент импульса силы и тем самым сообщил ему момент количества движения. Момент импульса силы равен изменению момента количества движения, то есть произведению момента силы, приложенной к вашей машине, на длительность воздействия этой силы:

$$\text{момент импульса силы} = \text{момент силы} \times \text{время} \quad (2.3.5).$$

Чем больше момент силы и время его воздействия, тем большим будет момент импульса силы и тем заметнее изменение момента импульса машины. Еще раз: момент импульса силы — это тоже вектор, у которого есть направление. Если бы черный автомобиль, который врезался в вас, двигался относительно вашей машины по часовой стрелке, значит, его момент импульса силы имел бы противоположное направление и вы также вращались бы в другую сторону.

Разные по величине моменты сил, действующие в течение разных промежутков времени, могут сообщить машине одинаковые моменты импульса:

$$\begin{aligned} \text{момент импульса силы} &= \text{большой момент силы} \times \text{малое время} \\ &= \text{малый момент силы} \times \text{большое время} \end{aligned} \quad (2.3.6).$$

Следовательно, ваша машина будет вращаться с данным моментом импульса либо при длительном воздействии небольшого момента силы со стороны двигателя и нога, либо если черный автомобиль врежется в вас и за короткий промежуток времени приложит к вашей машине большой момент силы. Неожиданная передача момента импульса силы (как и самого импульса) может привести к повреждению машины и травмировать водителя, поэтому аттракцион сконструирован таким образом, что ни при каком ударе момент силы не превышает разумных пределов. И все-таки после нескольких таких “подкруток” вам вполне может потребоваться гигиенический пакетик — вроде тех, что предлагают пассажирам самолета при взлете и посадке!

Почему же момент импульса — величина сохраняющаяся? Как и импульс, момент импульса сохраняется вследствие третьего закона Ньютона для вращательного движения: если со стороны одного тела на другое действует момент силы, то со стороны второго тела на первое действует момент силы, равный ему по величине, но противоположно направленный.

### Третий закон Ньютона для вращательного движения

Каждому моменту силы, действующему на тело со стороны другого тела, отвечает равный по модулю и противоположный по направлению момент силы, действующий на первое тело со стороны второго.

Когда одна машинка действует на вторую с определенным моментом силы в течение какого-то времени, вторая действует на первую с равным, но направленным в противоположную сторону моментом силы в течение того же времени. Поскольку моменты сил равны и направлены навстречу друг другу, машинки, взаимно дей-

ствующие друг на друга с этими моментами сил, получают равные по величине и противоположные по направлению моменты импульса силы. Раз момент импульса, полученный одной машинкой, равен моменту импульса, утраченному другой машинкой, можно сказать, что момент импульса передан от одной машины другой.

Момент импульса машины зависит от ее момента инерции, поэтому разные машинки могут крутиться с разными угловыми скоростями даже при одинаковых моментах импульса. Например, если черный автомобиль ударится об очень тяжелый белый и передаст ему момент импульса, белая машина с ее огромным моментом инерции будет поворачиваться достаточно медленно. То же самое относится к импульсу — масса машины, которая получила импульс, влияет на скорость ее движения. А бампер, хотя и не влияет на массу машины, меняет его момент инерции. И если это происходит при вращении машины, ее угловая скорость меняется, а момент импульса — нет!

Чтобы понять, как меняется угловая скорость, рассмотрим движение перегруженного белого автомобиля. Парочка тяжеловесов, сидящих в нем, явно разочарована аттракционом: их огромная масса и момент инерции не дают им лихо разворачиваться и вертеться юлой так же лихо, как это делаете вы. Однако тут им приходит в голову отличная мысль: пока их автомобиль вяло разворачивается на площадке, пассажир забирается на колени к водителю, так что они оба оказываются очень близко к центру масс машины. Перераспределив таким образом общую массу, они смогли снизить момент инерции, и их машина стала гораздо более маневренной!

Величина	Единицы СИ	Английские единицы	СИ > английские единицы	Английские единицы > СИ
Импульс	килограмм-метр в секунду (кг·м/с)	фунт-фут в секунду (lbf·ft/s)	1 кг·м/с = 7,2329 lbf·ft/s	1 lbf·ft/s = 0,13826 кг·м/с
Момент импульса	килограмм-метр <sup>2</sup> в секунду (кг·м <sup>2</sup> /с)	фунт-фут <sup>2</sup> в секунду (lbf·ft <sup>2</sup> /s)	1 кг·м <sup>2</sup> /с = 23,730 lbf·ft <sup>2</sup> /s	1 lbf·ft <sup>2</sup> /s = 0,042140 кг·м <sup>2</sup> /с

Поскольку масса белой машины перераспределилась, эта машина уже не является свободно вращающимся жестким телом, которое подчиняется первому закону Ньютона для вращательного движения. Однако это тело (белая машина) все же вращается в отсутствие внешних сил, и, следовательно, оно подчиняется более общему, но не менее полезному правилу: момент импульса тела, не подверженного воздействию внешних моментов сил, не меняется. Если момент инерции машины уменьшится, ее угловая скорость должна возрасти, чтобы сохранился момент импульса. Именно это и происходит. Как раз изменением момента инерции объясняется высокая угловая скорость выполняющего вращение фигуриста: он вытягивается в струнку, чтобы превратиться в как можно более тонкий вращающийся объект.

### Сохраняющаяся величина — момент импульса

#### (момент количества движения)

Средство передачи — момент импульса силы

**Момент импульса (момент количества движения)** — мера вращательного движения тела, его стремления постоянно вращаться вокруг данной оси. Момент импульса — это вектор, то есть он имеет направление. Однако не имеет потенциальной формы и не накапливается в скрытом виде; момент импульса = момент инерции × угловая скорость.

**Момент импульса силы** — механическое средство переноса момента импульса (количества движения); момент импульса силы = момент силы × время.

### Три сохраняющиеся величины

Когда вы ведете свою машинку по овальной площадке автодрома, ее движение в основном управляется законами сохранения трех величин — энергии, импульса и момента импульса (таб. 2.3.1). И в то время как вы, поворачивая руль и нажимая на акселератор, обмениваетесь этими величинами с полом площадки и энерге-

тической компанией, обслуживающей автодром, большинство интересующих нас актов обмена происходит во время столкновений.

Таблица 2.3.1. Три сохраняющиеся при движении физические величины и механизмы их передачи

Сохраняющаяся физическая величина	Механизм передачи
Энергия	Совершение работы
Импульс (количество движение)	Импульс силы
Момент импульса (количества движения)	Момент импульса силы

Ваша машинка подталкивает другую вперед и при этом обязательно совершает над ней работу и передает ей энергию. Если ваша машинка коротким ударом направляет другую машину к северу, она всегда передает ей направленный к северу импульс силы и тем самым сообщает направленный к северу момент импульса. И если ваша машинка заставляет другую закрутиться по часовой стрелке вокруг ее центра масс, она всегда передает ей соответственно направленный момент импульса силы, то есть момент количества движения. Именно эти кратковременные и бурные акты обмена энергией, импульсами и моментами импульса и составляют главную прелесть аттракциона.

## Потенциальная энергия и ускорение

Лишь незадолго до конца сеанса вы замечаете, что пол в центре площадки имеет некоторое углубление. За годы работы аттракциона поверхность его прогнулась так, что площадка теперь напоминает очень мелкую и очень пологую чашу, и вы замечаете, что машины естественным образом скатываются в эту чашу и приобретают ускорение, направленное в сторону самого глубокого места. Пока автомобильчик по инерции проскакивает эту “ложбину”, его ускорение направлено к ее центру, из-за чего меняется скорость. Некоторые машины проезжают через самый центр ложбины, и их ускорение направлено вперед и на спуске, и на подъеме, но многие пересекают ложбину по касательной, и под влиянием ускорения их траектории изгибаются. Каждая такая машина выбирается из ложбины, так или иначе меняя направление движения (см. ❶).

Ранее на примере пандуса мы уже наблюдали подобную тенденцию тел приобретать ускорение, направленное вниз, а теперь давайте рассмотрим ее с точки зрения энергии: ускорение машины всегда направлено так, чтобы ее общая потенциальная энергия уменьшалась как можно быстрее. Поскольку потенциальная энергия отдельного автомобиля связана только с силой тяжести, его ускорение направлено так, чтобы как можно быстрее уменьшалась потенциальная энергия в поле сил тяготения — то есть по кратчайшему пути вниз, к самому глубокому месту ложбины.

Подобная картина — ускорение способствует наиболее быстрому уменьшению потенциальной энергии — наблюдается повсеместно. Потенциальная энергия и силы связаны от природы, и направление наиболее быстрого падения потенциальной энергии совпадает с направлением результирующей силы, то есть суммы всех приложенных к телу сил. Ускорение тела направлено так, чтобы потенциальная энергия уменьшалась как можно быстрее, потому что именно так направлена результирующая сила — и наоборот. С помощью этой закономерности можно прогнозировать движение тел: в какую сторону распрямится пружина, опрокинется стул или свернет автомобиль. В нашей книге мы часто будем прибегать к этому правилу.

Впрочем, не забывайте, что ускорение и скорость — понятия разные, и если ускорение машины направлено к центру площадки, это не означает, что туда же направлена ее скорость или что она вообще проедет через этот центр. Я не могу без конца повторять одно и то же, хотя и повторяю это в сотый раз — и да, я готов к тому, что мне скоро придется уворачиваться от летящих в меня яиц и помидоров! Тем более что эти метательные снаряды, как я полагаю, будут пущены исключительно для того, чтобы на опыте подтвердить разницу между ускорением и скоростью.

❶ В гольф и крокет играют на открытых травяных полях, которые никогда не бывают идеально ровными и плоскими. Когда мячик для гольфа или шар для крокета катятся по неровной земле или по склону, их ускорение направлено туда, куда направлен уклон на данном участке поля, и это ускорение является причиной изгиба траектории. Опытные игроки умеют “читать” ландшафт и заранее знают, как будет направлено ускорение мяча или шарика, что дает им возможность рассчитать траекторию и извлечь из этого пользу.



## Потенциальная энергия и ускорение

Ускорение тела направлено так, чтобы его потенциальная энергия уменьшалась как можно быстрее.

## Подушки, ремни безопасности и зоны смятия

От столкновений на аттракционе “Автодром” все в восторге, однако столкновение настоящих автомобилей — далеко не такая забавная штука. Внезапная передача импульса и высвобождение энергии во время аварии может стать причиной травм и гибели людей, поэтому при разработке средств обеспечения безопасности автомобиля большое внимание уделяется именно этим физическим величинам.

При всем разнообразии автомобильных аварий в большинстве случаев проявляются одни и те же физические закономерности. Чтобы уменьшить последствия аварии, нужно, чтобы при столкновении не происходил резкий переход импульса и чтобы вся выделившаяся энергия куда-нибудь исчезла. Чтобы эта мысль стала более понятной, давайте изучим простой вариант аварии — машина врежется в дерево. А чтобы показать вам, до какой степени я уверен в безопасности собственного автомобиля, давайте предположим, что на дерево наехал именно я (надеюсь, это предположение не повлияет на мою страховку).

Но пока что я еще не врезался в дерево и еду прямо на север со скоростью 50 км/ч. И я сам, и моя машина обладаем сейчас немалым импульсом, направленным на север, и значительной кинетической энергией. Напомню, что кинетическая энергия, как и любая другая форма энергии, направления не имеет.

И вдруг откуда ни возьмись прямо на дороге появилось дерево!.. Хорошо-хорошо, согласен, это я слегка задремал, и мне только показалось, что дерево внезапно выросло прямо посреди шоссе. Но так или иначе, прежде чем я успеваю отреагировать, мой автомобиль врежется в толстый ствол...

Посмотрим, что будет дальше. Дерево и машина не могут одновременно находиться в одной точке пространства, поэтому они отталкиваются друг от друга с равными и противоположно направленными силами. Машина толкает дерево к северу, а дерево машину — к югу. Дерево стоит крепко, его корни уходят глубоко в землю, ускорения оно практически не получает. Зато мою машину мгновенно отбрасывает к югу. За какие-то доли секунды ее скорость падает с 50 км/ч до нуля.

О том, что случилось при этом со мной, — позже, а пока посмотрим, как меняются импульс и энергия автомобиля. До аварии он имел направленный к северу импульс и изрядный запас кинетической энергии. После аварии импульс и кинетическая энергия стали равны нулю. Если и импульс, и энергия — сохраняющиеся величины, то куда же они подевались?

Импульс передается посредством импульса силы: автомобиль в течение короткого отрезка времени толкал дерево к северу и при этом передал ему весь свой направленный к северу импульс. Дерево, в свою очередь, в течение короткого отрезка времени толкало к северу почву, в которой оно укоренено, и передало земле направленный к северу импульс. Вот почему оно осталось стоять на месте: дерево не сохранило импульс. А раз импульс передался так быстро, то формирующие его силы были очень велики. Вспомним: импульс силы равен произведению силы на время, и чем меньше время, тем больше сила.

Однако энергия дереву не передалась. От удара автомобиля дерево не сдвинулось, значит, работа над ним не была произведена. Кинетическая энергия автомобиля превратилась в энергию другого рода — в самом автомобиле.

Этот вывод указывает на первое средство безопасности из примененных в моей машине — так называемую зону смятия (рис. 2.3.3). В конструкции автомобиля специально предусмотрены зоны, в которых конструкция может быть деформирована. Смять что-либо означает совершить работу — на сминаемый элемент конструкции действует сила, вдавливающая его поверхность внутрь. Поэтому когда кузов машины деформируется, кинетическая энергия, которой он (как и весь автомобиль) обладал до аварии, переходит в тепловую и химическую потенциальную энергию деформируемого материала. Моему автомобилю больше не ездить по дорогам, зато рассеяние кинетической энергии меня лично не затронуло, чему я очень рад.



Рис. 2.3.3. Национальное управление по безопасности движения на автострадах США анализирует автомобильные аварии, чтобы выяснить, как ведут себя при столкновении те или иные транспортные средства. При лобовом ударе передние части кузовов этих легковых автомобилей и пикапов сминаются, поглощают энергию и замедляют передачу импульса. Одновременно разворачивается и надувается подушка безопасности, которая смягчает удар и оберегает человека. И пассажиры, и водитель теряют свои направленные вперед импульсы, но поскольку продолжительность процесса передачи импульса увеличивается, силы, участвующие в этой передаче, уменьшаются. Подушка безопасности поглощает импульс гораздо медленнее, чем руль и приборная доска, поэтому сила удара и риск серьезных травм значительно снижаются.

Теперь заглянем в салон в момент удара. Несмотря на то что автомобиль, окружающий меня со всех сторон, мгновенно прекратил движение, я все еще перемещаюсь вперед по инерции со скоростью 50 км/ч. Я сохранил свой направленный к северу импульс и свою кинетическую энергию и очень хотел бы избавиться от них плавно и постепенно, насколько это возможно. К счастью, у меня есть ремень и подушка безопасности, которые мне в этом помогут.

Если бы меня ничто не держало, я вылетел бы через лобовое стекло в северном направлении. Но ремень безопасности мгновенно натягивается, и я начинаю толкать его на север, а он меня — на юг. Эти воздействия длятся достаточно долго, поэтому я передаю свой направленный к северу импульс ремню постепенно и силы сравнительно невелики. Пока все не так уж страшно.

Но передо мной угрожающе торчит руль. Ударившись прямо об него, я сразу же передам ему остатки своего направленного к северу импульса. Такой быстрый переход импульса предполагает большую силу, и я могу лишиться не только чувства юмора, но и всех прочих чувств.

Однако подушка безопасности надувается раньше, чем я успеваю по инерции налететь на рулевое колесо, и мое лицо тонет в ней. Я передаю подушке направленный к северу импульс, но на это тратится относительно много времени. Неважно, обо что я ударюсь — о руль или о подушку, — импульс один и тот же, но силы, от которых он зависит, разные. Медленный переход импульса к подушке безопасности требует малых сил, а быстрый переход моего импульса к рулю — больших. Ура, подушка безопасности сработала!

Но вот пыль осела, и я вылезая из машины — потрясенный, но без сотрясения мозга. Мой направленный к северу импульс приняли на себя ремень и подушка безопасности, а большая часть моей кинетической энергии перешла к подушке в результате работы, совершенной моим лицом над ее поверхностью.

Прежде чем закончить эту тему, я хотел бы отметить, что все механизмы, которые затягивают ремни безопасности и надувают подушки, основаны на только что рассмотренных нами законах физики. Они распознают высокое ускорение машины в случае аварии, сравнивая движение автомобиля с движением инертного эталона. Ускорение машины при столкновении резко увеличивается, но эталон движется или пытается двигаться вперед по инерции (равномерно и прямолинейно), а датчики “наблюдают” за движением двух тел относительно друг друга и сравнивают силы, необходимые для придания ускорения обоим телам одновременно. Несмотря на свои микроскопические размеры, современные миниатюрные датчики ускорения исправно подчиняются второму закону и уравнению зависимости силы и ускорения.

## Молотки, клинья и другие инструменты

Чтобы вбить в деревяшку толстый гвоздь, надо приложить немалую силу, потому-то вы и не можете сделать это голыми руками. Однако несколькими ударами молотка вы легко загоните его в доску по самую шляпку (рис. 2.3.4). В чем же секрет этого фокуса?

На первый взгляд кажется, что важен вес молотка, но дело не в этом. Ведь вы намного тяжелее молотка, однако не можете пальцем вдавить гвоздь в деревяшку, а молоток одинаково легко заколотит гвоздь и в потолок, и в пол. На самом деле роль тут играет не вес, а масса молотка, и ключевое слово здесь — импульс.

Вы замахиваетесь молотком на гвоздь и сообщаете инструменту импульс путем передачи импульса силы — ваше движение длится какое-то время. Затем следует удар по шляпке гвоздя, и молоток передает гвоздю свой импульс посредством еще одного импульса силы. Но если тот импульс, который вы передали молотку, подразумевает длительное воздействие умеренной силы, то импульс, который молоток передает гвоздю, подразумевает очень большую силу, действующую в течение доли секунды. При быстром переносе импульса сила очень велика, и эта самая ударная сила вгоняет гвоздь в дерево.

Воздействие молотка будет наиболее интенсивным при кратчайшем времени воздействия — по этой причине ударная часть молотка, как правило, делается из твердой стали. Чем тверже молоток, тем быстрее он передает свой импульс тому



Рис. 2.3.4. Весь направленный вниз импульс, который вы сообщаете молотку, замахнувшись, передается гвоздю за время краткого удара. Поскольку время передачи импульса мало, со стороны молотка должна быть приложена очень большая сила, чтобы его импульс перешел к гвоздю. Эта ударная сила вбивает гвоздь в доску.

предмету, по которому им бьют, и тем большей будет максимальная сила удара. Чтобы забить гвоздь, лучше приложить большую силу, поэтому предпочтителен молоток из более твердого материала с большим импульсом (то есть с большой массой и скоростью). В случаях, требующих особенно большой силы, можно воспользоваться кувалдой — массивная головка и длинная ручка этого инструмента позволяют развить огромный импульс к моменту, когда ударная часть молота обрушится на цель.

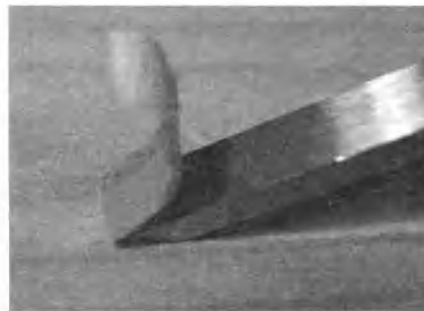
Но если вы боитесь повредить поверхность, по которой бьете, возьмите инструмент из более мягкого материала. Твердый молоток концентрирует передаваемый импульс и во времени, и в пространстве, производит большую ударную силу, но зато вполне может разрушить предмет, по которому вы колотите. Различной твердости и формы резиновые молотки и деревянные киянки рассчитаны на длительную передачу импульса: при ударе такого инструмента растягивается время воздействия и уменьшается максимальная ударная сила, к тому же эта сила распределяется по большей площади, что позволяет избежать повреждения поверхности, по которой наносится удар. Подобные молотки делают из самых разных материалов — от мягкой (низкоуглеродистой) стали, меди или свинца до пластика, резины или дерева. Если материал молотка мягче, чем материал предмета, по которому вы бьете, то обычно удается сохранить в целости поверхность последнего.

Молоток особенно полезен, когда вам нужно вбить клин в какой-либо материал. Форму клина имеет рабочая часть инструментов, которые используются для того, чтобы расколоть надвое какой-нибудь предмет — например, полено. Клин дает тот же выигрыш в силе, что и наклонная плоскость, — когда он с умеренным усилием все глубже входит в трещину в полне, расширяя ее, части полена раздвигаются на небольшое расстояние, но зато с колоссальным усилием. Более того, работа вашей маленькой силы по перемещению клина на большое расстояние вглубь трещины передается поперек трещины в виде огромной силы, действующей на маленьком расстоянии.

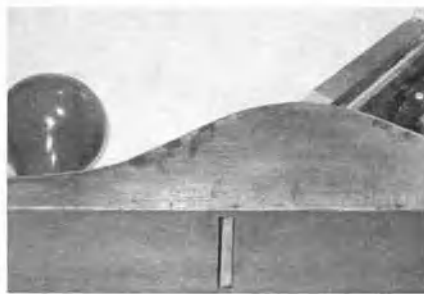
Одни инструменты с клиновидной рабочей частью — например, долото и резец (рис. 2.3.5), рубанок (рис. 2.3.6) или пилу — вы приводите в движение непосредственно, другие — например, сверла (рис. 2.3.7) или винты — с помощью какого-либо вращающегося механизма, но самые мощные клинья — это те, при работе с которыми используется ударная сила. Чтобы расколоть полено, можно с помощью кувалды вогнать в его торец стальной клин. Выигрыш в силе, который дает клин, вкупе с огромной силой, приложенной к нему со стороны кувалды в момент удара, позволяет расколоть самую твердую древесину. Колун представляет собой сочетание кувалды с клином, а обычный топор — это более изощренный вариант того же принципа. Работать долотом по камню или стамеской по твердому дереву гораздо проще при помощи ударов киянкой по торцу рукоятки режущего инструмента, так, чтобы последний входил в материал под воздействием кратких, но интенсивных ударных нагрузок.



**Рис. 2.3.7.** Когда сверло, прижатое к металлической заготовке, вращается по часовой стрелке, две его заточенных режущих кромки отрезают от поверхности металла стружку. Косые кромки дают выигрыш в силе, поэтому достаточно сообщить сверлу небольшой момент силы, чтобы острые кромки, двигаясь по кругу на поверхности металла, начали срезать стружку.



**Рис. 2.3.5.** Резец стамески, продвигаясь влево, выдавливает стружку вверх на свою наклонную поверхность. Наклонная поверхность дает выигрыш в силе, поэтому относительно малая направленная влево сила порождает гораздо большую по величине силу, которая поднимает стружку и отрывает ее от куска дерева. Если бы резец был шире, а древесина тверже, то для того, чтобы сдвинуть резец и снять стружку, надо было бы приложить более значительную силу, направленную влево. Этого можно добиться, ударив по торцу рукоятки стамески молотком. Тогда ударная сила заставит резец продвинуться влево.



**Рис. 2.3.6.** Клиновидное лезвие, выступающее из-под рабочей плоскости рубанка, движущегося влево по доске, срезает с ее поверхности тонкий слой древесины. Острый угол лезвия обеспечивает выигрыш в силе, поэтому для того, чтобы снять стружку, достаточно лишь слегка надавить на рубанок, направив усилие влево. Умелый столяр настолько точно рассчитывает усилие, что поверхность доски становится безупречно гладкой.



## ГЛАВА 3

# МЕХАНИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА

**М**не очень нравится тот эпизод в фильме “Бутч Кассиди и Санденс Кид”, когда Санденс нанимается на работу охранником в Боливии и ему, чтобы проверить его меткость, предлагают попасть из револьвера в лежащую на земле монету. Стоя на некотором отдалении от монеты, Санденс несколько раз стреляет, промахивается и спрашивает: “А можно на бегу?” Получив утвердительный ответ, он с лету тремя выстрелами подряд поражает цель. Очевидно, его сноровка напрямую связана со свободой движений.

Когда я рассказываю о научной основе обыденных вещей и явлений, мне тоже нужна свобода. Я, конечно, не Санденс — я просто объясняю, как работают физические законы, — однако если есть возможность чуть-чуть отклониться от прямого курса и рассмотреть тему с разных точек зрения, у меня появляется больше уверенности в том, что мы досконально ее изучили.

Первые две главы дались мне трудновато, потому что я еще не научился двигаться достаточно свободно. Я старался излагать материал добросовестно, шаг за шагом, не отвлекаясь на мелочи и — что было бы еще хуже — не забегая вперед. И если до сего момента мое занудство превращало эту книгу в отличное средство от бессонницы, то теперь, надеюсь, все переменится.

Мы изучили законы движения и теперь можем с их помощью объяснить, как работают различные бытовые приборы и устройства. Но хотя нам уже понятны основные принципы действия тачки, спортивного тренажера или горнолыжного подъемника, мы пропустили ряд законов механики, которые также играют важную роль в окружающем нас мире. В этой главе мы рассмотрим еще несколько понятий.

Одно из самых значимых новых для нас явлений — это перегрузка, ощущение ускорения. Использовать ускорение в бытовых условиях довольно скучно — мы толкаем тележку, тележка движется с ускорением. Но если включить фантазию — скажем, мы стремительно несемся вниз после первого же подъема на головокружительных американских горках в парке аттракционов, — ускорение приобретает куда более интригующий характер. Крепче держите шляпу!

- 78 **3.1 Пружинные весы**  
*Как распрямляется сжатая пружина и как взвешивают вещи.*
  
- 88 **3.2 Отскок мяча**  
*Как мяч накапливает энергию и отскакивает после соударения.*
  
- 98 **3.3 Карусели и американские горки**  
*Как мы приобретаем и как воспринимаем ускорение на аттракционах.*



### 3.1 Пружинные весы

Насколько вас много? Иными словами, какова ваша масса? Изо дня в день (если вы не слишком много едите) общее количество вещества, из которого вы состоите, остается примерно одним и тем же. Но нельзя ли узнать это более точно? Удобнее всего измерять количество вещества в килограммах — столько-то килограммов золота, зерна... или вас. Масса — это мера инерции тела, и, как мы видели в разделе 1.1, она не зависит от окружающей среды и от сил тяготения. Килограммовая коробка печенья всегда имеет массу 1 кг, в какой бы точке Вселенной вы с ней ни оказались.

Но измерить массу непосредственно очень трудно. Более того, само понятие массы появилось всего 300 лет назад. Так что нам приходится измерять количество вещества, из которого состоят предметы, взвешивая их. Одно из простейших и наиболее практичных устройств, с помощью которых можно решить эту задачу, — это пружинные весы, которые по сей день используются в ваннных комнатах и продуктовых магазинах. В них обязательно есть пружина, хотя обычно ее не видно.

#### Почему на весах надо стоять спокойно

Всякий раз, как вы встаете на весы у себя в ванной (или взвешиваете на похожих весах арбуз в магазине), вы измеряете вес. Вес тела — это сила, обусловленная действием гравитации (обычно речь идет о земном притяжении). Когда вы стоите на весах, они показывают величину силы, которая должна быть приложена к вам со стороны весов, чтобы вы не провалились сквозь них (и дальше сквозь землю). В большинстве случаев эта поддерживающая, направленная вверх сила обеспечивается пружиной весов. Если вы не двигаетесь, если у вас нет ускорения и ваш направленный вниз вес полностью компенсируется силой реакции опоры, — эти силы равны по модулю и направлены в противоположные стороны, поэтому в сумме дают нулевую результирующую силу. Следовательно, хотя весы на самом деле показывают, с какой направленной вверх силой они действуют на вас, ваш вес в точности равен величине этой силы.

Очень важно понять это едва уловимое различие между весом и показаниями весов. В то время как вес тела зависит только от гравитации в данном месте и ни-

как не связан с движением, процедура взвешивания чрезвычайно чувствительна к движению. Если в процессе взвешивания тело приобретает ускорение, весы не покажут его истинный вес. Допустим, вы подпрыгиваете на весах — тогда их показания могут варьироваться в очень широком диапазоне. У вас есть ускорение, и поскольку действующая на вас результирующая сила отлична от нуля, ваш направленный вниз вес и сила реакции опоры уже не уравновешивают друг друга. Хотите знать свой точный вес — стойте спокойно.

Но даже если вы стоите неподвижно, взвешивание — не самый надежный способ измерить количество вещества, из которого состоит ваше тело. Причина в том, что вес зависит от окружающей среды. Если вы всегда взвешиваетесь в одном и том же месте, показания весов будут более или менее постоянны — если вы, конечно, не будете регулярно съедать на десерт по дюжине пончиков. Но если вы полетите на Луну, где гравитация слабее, ваш вес составит всего лишь одну шестую часть земного веса. Впрочем, даже на Земле можно быстро изменить свой вес, стоит уехать куда-нибудь подальше: наша планета чуть сплюснута у полюсов, так что они находятся ближе к центру Земли, чем земная поверхность на экваторе. В результате земное притяжение на экваторе на 0,5% слабее, чем на полюсах. Эта разница в сочетании с большим ускорением, возникающим в результате вращения Земли (оно как раз максимально на экваторе), достаточна, чтобы вы, перебравшись с Северного полюса на экватор, стали весить на 1% меньше. Но, разумеется, просто переехать на юг — это не самая удачная стратегия избавления от лишнего веса.

## Растянутая пружина

Итак, вы знаете, что когда вы кладете на весы в магазине арбуз и считываете с циферблата цифры, то на самом деле эти цифры показывают значение направленной вверх силы, с которой пружина действует на арбуз. Тележка для продуктов тоже способна выдержать вес арбуза, но вы не сможете узнать, какова ее сила реакции опоры. В этом вся прелесть и польза пружины: между ее длиной и приложенными к ее концам силами существует простая зависимость. Следовательно, измерив длину пружины, можно по соответствующей шкале определить величину действующей на арбуз силы.

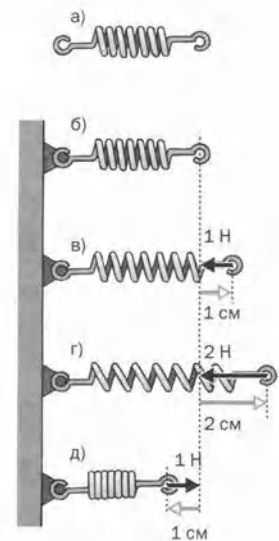
На **рис. 3.1.1** изображена проволочная пружина. Сила, действующая на ее концы при растяжении, направлена внутрь, к центру пружины, а при сжатии пружины — наружу. Иными словами, растянутая пружина пытается уменьшить свою длину, сжатая — увеличить. Если пружина не сжата и не растянута, никакие силы на ее концы не действуют.

Верхняя пружина на рисунке (**рис. 3.1.1, а**) не сжата и не растянута, и если она просто лежит на столе, то ее концы неподвижны: они находятся в состоянии равновесия, то есть к ним приложена результирующая сила, равная нулю. Как и подсказывает формулировка “нулевая результирующая сила”, состояние равновесия означает, что сумма всех действующих на тело сил равна нулю и тело не имеет ускорения. Например, вы находитесь в состоянии равновесия, когда спокойно сидите в кресле.

Пружина на **рис. 3.1.1, а**, имеет равновесную длину — то есть свою естественную длину, и если пружину оставить в покое, эта длина не будет меняться. Но при любом растяжении или сжатии пружина будет стремиться вновь вернуться в состояние равновесия. Если ее растянуть так, чтобы ее длина увеличилась относительно равновесной, пружина будет тянуть свои концы обратно к середине. Если пружину сжать, она станет короче и начнет толкать концы наружу.

Давайте закрепим левый конец пружины (**рис. 3.1.1, б**) и посмотрим, как будет вести себя правый конец. Пока пружину ничто не растягивает и не сжимает, ее свободный конец сохраняет равновесие в данных условиях — останется в равновесной позиции. Если мы растянем или сожмем пружину и отпустим свободный конец, она естественным образом вернется в состояние равновесия и правый конец также будет находиться в той же позиции.

А что, если оттянуть правый конец вправо и не отпускать его? Тогда со стороны пружины на него будет действовать довольно большая, направленная к середине сила, которая стремится вернуть конец пружины в прежнее положение. Чем больше мы растягиваем пружину, тем более значительная сила будет тянуть



**Рис. 3.1.1.** Пять одинаковых пружин. Концы пружины (а) свободны, поэтому пружина сохраняет равновесную длину. Левые концы других пружин закреплены, перемещаться могут только правые концы. Если свободный конец пружины (б) сдвинется из состояния равновесия (в, г и д), на него со стороны пружины будет действовать сила упругости, пропорциональная расстоянию от исходной точки до той, в которой он находится в данном случае.

правый конец в направлении, противоположном растягиванию. Примечательно, что эта направленная к середине пружины сила прямо пропорциональна расстоянию, на которое (относительно равновесной длины) мы оттягиваем конец. На **рис. 3.1.1, в**, конец пружины отстоит от равновесной длины на 1 см, и пружина тянет его влево с силой 1 Н; если оттянуть конец вправо на 2 см (**рис. 3.1.1, г**), то направленная влево сила со стороны пружины составит 2 Н. Такая же пропорциональность наблюдается и при сжатии пружины: на **рис. 3.1.1, д**, конец смещен влево на 1 см, и пружина толкает его вправо с силой 1 Н.

Таким образом, сила, которую развивает пружина, обладает двумя интересными свойствами. Во-первых, эта сила всегда направлена так, чтобы пружина возвращалась в исходное состояние равновесия. Эта возвращающая сила называется силой упругости. Во-вторых, сила упругости пропорциональна деформации растяжения и сжатия, то есть изменению равновесной длины.

Эти две зависимости выражены в законе Гука:

$$\text{сила упругости} = - \text{коэффициент упругости} \times \text{деформация} \quad (3.1.1)$$

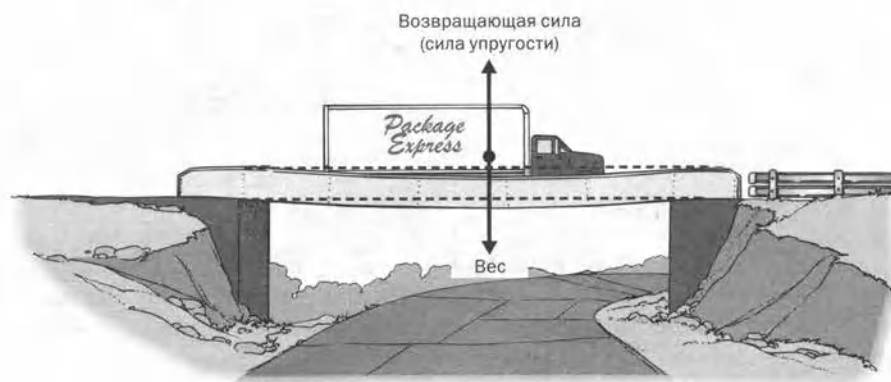
Закон назван именем англичанина Роберта Гука, который открыл его в конце XVII века. Коэффициент упругости (он же коэффициент жесткости пружины, или константа пружины) в этом уравнении служит мерой жесткости пружины. Чем выше коэффициент упругости — то есть чем жестче пружина, — тем более значительную силу разовьет пружина при данном изменении ее длины. Знак минус указывает на то, что сила упругости всегда направлена против деформации.

### Закон Гука

Восстанавливающая сила (сила упругости), возникающая в упругом теле, пропорциональна его деформации относительно равновесной формы.

Пружины отличаются друг от друга жесткостью, показателем которой служат их константы. Мягкая пружина имеет низкую жесткость — такая пружина выталкивает из тостера поджарившийся ломтик хлеба, ее легко прижать рукой. Иное дело — большие пружины, которые удерживают кузов автомобиля над колесами: это жесткие пружины с высокими константами. Но все пружины, независимо от размера и жесткости, подчиняются закону Гука.

Закон Гука универсален, и сфера его применения не ограничивается витыми пружинами. Практически все, что вы попытаетесь деформировать, будет сжиматься или растягиваться с силой, пропорциональной изменению длины относительно равновесной — или, в более сложных случаях, пропорциональной изменению равновесной формы. Равновесной считается такая форма тела, которую оно принимает в отсутствие внешних воздействий. Если согнуть ветку, она распрямится с силой, пропорциональной расстоянию, на которое ее согнули. Если



**Рис. 3.1.2.** Стальной мост прогибается под тяжестью грузовика. Мост будет изгибаться вниз до тех пор, пока направленная вверх сила упругости, с которой он действует на грузовик, не компенсирует полностью вес машины.



растянуть до известного предела резиновый бинт, он сожмется вновь с силой, пропорциональной его удлинению. Если сжать мячик, он вернет себе сферическую форму с силой, пропорциональной степени сжатия. И мост, прогнувшийся под весом многотонного грузовика, затем выгнется вверх с силой, пропорциональной величине прогиба (рис. 3.1.2).

Однако закон Гука имеет свои ограничения. При очень больших деформациях возвращающая сила будет меньше той, которая должна была бы возникнуть согласно этому закону. Дело в том, что в таких случаях бывает превышен предел упругости материала и может произойти необратимая деформация. Если растянуть пружину слишком сильно, она может так и остаться растянутой; если слишком сильно согнуть ветку, можно ее сломать. Но пока вы не превысили предел упругости, закон Гука справедлив почти всегда — и для веревки, и для стальной линейки, и для апельсина или батута.

Для того чтобы деформировать пружину, надо совершить работу. Когда вы растягиваете пружину рукой — то есть перемещаете ее конец от середины, — от вас к пружине передается энергия. Пружина накапливает эту энергию в виде потенциальной энергии упругой деформации. Если вы, наоборот, вернете пружину в исходное состояние, она передаст большую часть своей энергии вашей руке, а небольшая доля превратится в тепловую энергию за счет трения в самой пружине. Чтобы сжать, погнуть или скрутить пружину, также необходимо совершить работу. Короче говоря, пружина, выведенная из состояния равновесия, всегда обладает потенциальной энергией упругой деформации.

## Как весы в магазине измеряют вес

Теперь мы можем понять, как работают пружинные весы. Представьте себе безмен. У него внутри имеется спиральная пружина — пусть она будет подвешена за верхний конец к потолку (рис. 3.1.3). На нижнем конце закреплена чаша. Для простоты допустим, что сама чаша весит очень мало или не весит ничего. Если ничто не тянет пружину вниз, она сохраняет свою равновесную длину и чаша весов при равной нулю результирующей силе находится в состоянии устойчивого равновесия. Если сдвинуть чашу весов вверх или вниз, а затем отпустить ее, пружина вернет ее в исходную позицию.

Если вы положите на чашу весов арбуз, его вес потянет чашу вниз. Чаша начнет опускаться, пружина при этом растянется и начнет действовать на чашу с направленной вверх силой. Чем сильнее растягивается пружина, тем больше будет направленная вверх сила, и рано или поздно пружина растянется настолько, что эта сила полностью компенсирует вес арбуза. Теперь чаша находится в новом состоянии равновесия — и вновь результирующая сила равна нулю.

Но как понять, сколько весит арбуз? С помощью закона Гука. Когда чаша весов достигнет нового состояния равновесия, при котором вес арбуза будет полностью погашен направленной вверх силой упругости, деформация пружины будет служить точной мерой веса арбуза.

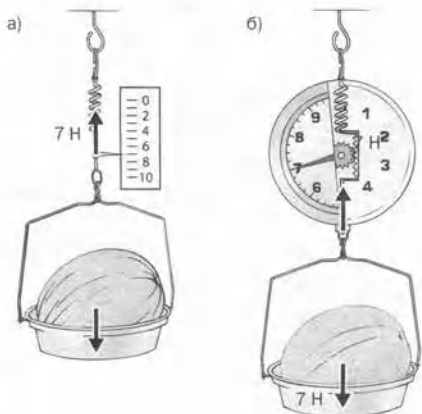


Рис. 3.1.3. Арбузы взвешиваются на двух весах. И те и другие весы уравнивают направленный вниз вес арбуза за счет направленной вверх силы упругости. Чем тяжелее арбуз, тем сильнее растянется пружина, прежде чем произведет силу упругости, достаточную для компенсации веса арбуза. На рис. (а) стрелка показывает удлинение пружины — и тем самым вес арбуза. На рис. (б) зубчато-реечный механизм поворачивает стрелку весов. Рейка-гребенка движется вверх и вниз, поворачивая зубчатое колесико.

Два безмена на **рис. 3.1.3** отличаются один от другого лишь способом измерения деформации пружины относительно равновесной длины. На **рис. 3.1.3, а**, стрелка крепится к концу пружины, а на **рис. 3.1.3, б**, показан безмен с зубчато-реечным механизмом, который преобразует слабое прямолинейное растяжение пружины в гораздо более заметное вращение стрелки циферблата. К нижнему концу пружины крепится зубчатая рейка, а стрелка соединена с зубчатым колесиком. Когда пружина растягивается, рейка опускается вниз, и ее зубцы поворачивают колесико. Чем ниже опускается рейка, тем больше поворачивается колесико и тем более высокий вес показывает стрелка.

И те и другие весы показывают численное значение веса выбранного вами арбуза. Но для того чтобы показаниям весов можно было доверять, их надо предварительно откалибровать. Калибровка — это процесс, в ходе которого показания конкретного прибора или характеристики определенного образца сравниваются с неким общепринятым стандартом. Цель этой процедуры — обеспечение точности измерений. Чтобы откалибровать пружинные весы, надо сравнить их показания с весом стандартного груза: положить в чашу весов стандартные разновесы и измерить отклонение данной конкретной пружины. Не бывает двух совершенно одинаковых пружин, хотя производители стараются по возможности унифицировать свою продукцию.

## Весы напольные пружинные



**Рис. 3.1.4.** Когда вы встаете на эти весы, платформа немного смещается вниз и сжимает жесткую пружину. Степень сжатия пропорциональна вашему весу, который можно узнать по цифрам на шкале. Рычаги в механизме весов компенсируют погрешность, возникающую из-за того, что при каждом взвешивании вы можете стоять на разных частях платформы.

Как мы уже говорили, простейшая модель напольных весов — это пружинные весы (**рис. 3.1.4**). Вы встаете на них, при этом нажимаете ступнями на верхнюю панель, и внутренние рычаги воздействуют на скрытую от вас пружину. Пружина деформируется до тех пор, пока через те же рычаги на вас не начнет действовать направленная вверх сила, равная вашему весу. Одновременно зубчато-реечный механизм (**рис. 3.1.3, б**) поворачивает колесико со шкалой, на которую нанесены цифры. Когда колесико остановится, эти цифры появятся в окошке. Число, которое вы там увидите, зависит от деформации пружины, то есть от вашего веса.

Однако прежде чем остановиться, колесико прокручивается туда и сюда относительно положения, соответствующего вашему истинному весу. Это происходит потому, что весы, постепенно избавляясь от избыточной энергии, то поднимают, то опускают вас. В тот момент, когда вы встаете на весы, пружина еще не растянута и никак на вас не воздействует. Встав на весы, вы опускаетесь вниз. По мере того как вы опускаетесь, пружина растягивается и весы начинают толкать вас вверх. Но, достигнув уровня равновесия, где весы правильно показали бы ваш вес, вы продолжаете спускаться и по инерции проскакиваете положение равновесия. Цифры в окошке превышают ваш настоящий вес.

Но теперь весы придают вам ускорение, направленное вверх. Вы опускаетесь все медленнее и вскоре начинаете подниматься обратно к равновесному уровню. И вновь вы по инерции проскакиваете нужную высоту, и на этот раз весы показывают значение меньше истинного. Вы качаетесь вверх и вниз, поскольку обладаете избыточной энергией, которая переходит из потенциальной в кинетическую, в потенциальную энергию упругой деформации и обратно. Эти колебания продолжатся до тех пор, пока трение скольжения внутри весов не превратит всю энергию в тепловую. Лишь тогда колебания прекратятся, и весы покажут ваш точный вес.

Подобные колебания туда-сюда вокруг положения равновесия — весьма интересный вид движения, и мы будем подробно изучать его в главе 9 на примере часов. Вы являетесь собой груз, который поддерживается пружиной, а ваши ритмичные подъемы и опускания сходны с колебаниями гармонического осциллятора. Гармонические осцилляторы повсеместно распространены в природе и играют в ней настолько важную роль, что им посвящена вся девятая глава. Но об этом позднее, а вот две особенности вашего нынешнего положения я хотел бы обсудить прямо сейчас.

Во-первых, в состоянии равновесия ваша потенциальная энергия минимальна. Даже если учесть два вида потенциальной энергии — энергию в поле сил тяготения и энергию упругой деформации, — их сумма увеличивается, когда вы минуете положение равновесия. Так как ускорение тела всегда направлено так, чтобы его общая потенциальная энергия уменьшалась как можно быстрее, ваше ускорение всегда направлено к точке устойчивого равновесия.

Во-вторых, в положении равновесия ваша кинетическая энергия максимальна. Пока вы не достигли точки равновесия, ускорение направлено к ней, поэтому вы движетесь все быстрее и по инерции проскакиваете мимо этой точки. Но как только вы прошли точку равновесия, ваше ускорение меняет направление и снова обращено к ней. Теперь оно направлено назад, против вектора скорости, поэтому вы движетесь медленнее. Следовательно, максимальной скорости и максимальной кинетической энергии вы достигаете в тот момент, когда проходите положение равновесия. Пока вы колеблетесь вместе с площадкой весов, ожидая, когда весы утилизируют вашу избыточную энергию, этот излишек периодически преобразуется из кинетической энергии в потенциальную, и наоборот.

### Распространенное заблуждение: равновесие и неподвижность

**Заблуждение:** в состоянии равновесия тело не движется.

**Как на самом деле:** в состоянии равновесия тело не имеет ускорения, но его скорость необязательно равна нулю. Если в точке равновесия тело движется, оно минует эту точку по инерции с постоянной скоростью.

## Взвешивание с использованием нескольких весов

Чтобы взвеситься самому, достаточно простых напольных весов, а вот как взвесить, например, пианино — ведь этот тяжелый, громоздкий предмет на весы так просто не поставишь? Однако выход есть — можно воспользоваться вторыми весами. Если подсунуть весы под оба конца инструмента, то вес пианино будет одновременно поддерживаться этими двумя весами. Каждый прибор покажет, с какой направленной вверх силой он действует на пианино, а сумма двух измерений будет равна весу музыкального инструмента в целом (рис. 3.1.5).

Показания каждого отдельно взятых весов зависят от положения центра тяжести пианино. Именно в этой точке приложен вес, и центр тяжести пианино совпадает с его центром масс. Самые длинные и толстые (и самые тяжелые) струны находятся в левой части этого музыкального инструмента, поэтому его центр тяжести смещен влево от середины. Следовательно, на левые весы приходится большая часть веса пианино, и они покажут больший вес.

Различие в показаниях весов можно объяснить в терминах вращательного движения. Как и качели в разделе 2.1, пианино может поворачиваться относительно центра масс и в ответ на действие суммарного момента сил приобретать угловое ускорение. Чтобы этого ускорения не возникало и пианино стояло на весах неподвижно, оно должно находиться в состоянии равновесия — то есть суммарный момент сил должен быть равен нулю.

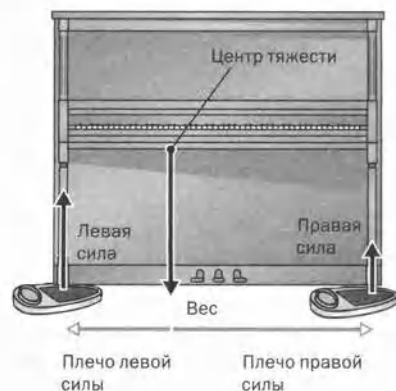
Поскольку вес пианино приложен в его центре тяжести, не возникает момента силы, действующего относительно центра массы инструмента. Левые весы толкают вверх левую сторону пианино, то есть создают момент силы, который пытается повернуть пианино по часовой стрелке. Из уравнения 2.1.3 следует, что этот момент силы равен произведению левого горизонтального плеча на левую направленную вверх силу. Точно так же правые весы создают момент силы, поворачивающий пианино против часовой стрелки и равный произведению правого горизонтального плеча на правую направленную вверх силу.

Если пианино находится в состоянии равновесия, значит, эти моменты сил гасят друг друга; они должны быть равны по величине и противоположны по направлению. Равенство достигается при следующем условии:

$$\text{плечо левой силы} \times \text{левая сила} = \text{плечо правой силы} \times \text{правая сила}.$$

Левое плечо короче правого, поэтому левая сила должна быть во столько же раз больше правой. Поэтому весы слева показывают больший вес, чем весы справа.

Похожий эффект — когда на весы, расположенные ближе к центру тяжести, приходится более высокая нагрузка — наблюдается и при переноске тяжелых предметов. Если вы с приятелем попытаете перенести пианино, показанное на рис. 3.1.5, тому из вас, кто возьмется за левую сторону, придется тяжелее. Но если наклонить инструмент так, чтобы его центр тяжести оказался почти над головой



**Рис. 3.1.5.** Взвесить пианино можно на двух весах. Со стороны обоих приборов на пианино действует направленная вверх сила реакции опоры, и вес инструмента равен сумме этих двух сил, которые и измеряются с помощью весов.

одного из грузчиков (подобно тому, как показано на рис. 1.3.1, с. 33), то вес пианино почти полностью ляжет на плечи этого несчастного.



**Рис. 3.1.6.** Эти весы снабжены тензодатчиком — пружиной, деформация которой преобразуется в электронный сигнал. Когда вы кладете на весы продукты, маленький встроенный компьютер измеряет деформацию датчика напряжения и по результатам измерений рассчитывает вес. Нажав на кнопку “тара”, вы сообщите весам, какое состояние датчика следует считать соответствующим нулевому весу.

## Погрешности измерений и способы их устранения

Пружинные весы весьма популярны благодаря практичности и простоте устройства. Однако им изначально присущ ряд неизбежных недостатков. Пружина изнашивается, и ее равновесная длина со временем может измениться, и поэтому старые весы при пустой чаше иногда не указывают точно на ноль. У большинства моделей можно слегка вытянуть верхний конец пружины, так чтобы ее нижний конец вернулся на нулевую отметку, и тем самым исправить погрешность. Труднее ликвидировать другой связанный со старением прибора дефект — потерю жесткости пружины, из-за которой весы начинают все больше переоценивать вес предмета в чаше. По этой причине весы в магазине необходимо периодически проверять, чтобы убедиться в их точности, иначе вы получите товара меньше, чем должны были.

Третий порок заложен в самом способе измерения — например, точность весов с зубчато-реечным механизмом (рис. 3.1.3, б) неизбежно снижается. Трение приводит к тому, что зубчато-реечный механизм передает на пружину и чашу весов небольшие вертикальные силы. Эти силы слегка смещают чашу из положения равновесия вверх или вниз, и невозможно ни рассчитать их влияние, ни избавиться от него. Поэтому, если вы несколько раз взвесите на безмене арбуз, вы каждый раз увидите на шкале чуть разные цифры. Вес арбуза все тот же — различаются показания весов.

К счастью, у всех этих проблем имеется простое решение — современная версия пружинных весов с электронным датчиком. С точки зрения механики, этот датчик напряжения упругого тела (тензодатчик) представляет собой ту же пружину, которая при сжатии и растяжении отвечает на изгиб пропорциональной силой. Но этот датчик совсем иным способом показывает степень деформации. Он не поворачивает колесико и не отклоняет стрелку, а меняет свои электрические параметры. Деформация тензодатчика измеряется только с помощью электроники, поэтому она может быть очень мала — настолько мала, что изгибы и сжатия в механизме весов почти незаметны.

Классические пружинные весы постепенно вытесняются электронными: последние уже прижились в магазинах, ванных комнатах и на кухнях (рис. 3.1.6), не говоря уже о больницах и научных лабораториях. Поскольку в электронных весах нет механических узлов, они избавлены от погрешностей измерения, связанных с трением. Большинство моделей имеет функцию обнуления, поэтому нет необходимости перед каждым взвешиванием вручную выставлять весы на ноль. А поскольку электронный тензодатчик намного долговечнее металлической пружины, срок надежной службы электронных весов гораздо больше, чем обычных механических.

## Как взвесить астронавта

Пружинные весы неплохо справляются со своей задачей, пока ускорение отсутствует или оно очень мало, однако в условиях невесомости они абсолютно бесполезны. Представим себе астронавта, который летит по орбите вокруг Земли в космическом корабле с выключенными двигателями. Хотя на астронавта по-прежнему действует гравитация, а значит, он имеет вес, однако и он сам, и его космический корабль находятся в состоянии свободного падения, и их ускорение таково, что у астронавта возникает ощущение невесомости (об этом мы поговорим в разделе 3.3). Если астронавт захочет проверить свои ощущения и встанет на весы, они подтвердят — ошибочно, — что он не имеет веса. На самом деле дисплей весов покажет ноль потому, что человек и весы не оказывают друг на друга никакого воздействия. Они падают с одинаковой скоростью, и ни одна сила не вынуждает их двигаться как единое целое. По этой причине взвесить астронавта в космосе — непросто, хотя в действительности вес у него есть\*.

Зато измерить массу астронавта в космосе относительно несложно. Ведь астронавту сообщается импульс, и определить его массу можно по конечному изменению

\* Вес тела на Земле — это сила, с которой оно притягивается к Земле. Но космический корабль и сам падает на Землю (хотя из-за высокой скорости вращения вокруг планеты все время “промахивается” мимо нее). Сила земного притяжения действует и на космическом корабле, однако пружинные весы не будут ее показывать, поскольку и сами падают вместе с кораблем.

его скорости (рис. 3.1.7). Разумеется, astronaut должен быть предельно осторожен и не размахивать руками и ногами, поскольку необходимо, чтобы он перемещался как единый объект, а не как совокупность независимых элементов — лишь тогда будет измерена его полная масса. Чтобы обеспечить неподвижность, astronaut пристегивается ремнями к жесткой раме, к которой и прилагается сила. Ускорение рамы вместе с astronautом измеряется, чтобы определить их общую массу. Масса рамы известна, поэтому вычислить массу astronautа не составляет труда.

## Рычажные весы

На рычажных весах сравнивается вес двух тел, размещенных с двух сторон рычага (коромысла), словно на плечах качелей. Коромысло имеет точку опоры посередине и уравнивается при условии, что моменты сил, создаваемые обоими телами, компенсируют друг друга. На типичных рычажных весах два тела равноудалены от точки опоры (рис. 3.1.8), и коромысло находится в равновесии, если вес одного тела равен весу другого.

Поскольку вес пропорционален массе, два тела с одинаковым весом имеют также и равные массы. Таким образом, хотя принцип устройства весов базируется на понятии веса, они могут точно сравнивать и массы тел. Если на одной чашке весов размещено несколько стандартных разновесов, весы покажут массу тела на другой стороне — устройство уравнивается только при равенстве массы этого тела и суммы масс разновесов.

Поскольку земное притяжение воздействует на оба тела с равной интенсивностью, весы покажут точную массу, независимо от величины силы притяжения в данном конкретном месте. Общее ускорение весов тоже можно не учитывать. Даже если вы перевезете весы с Северного полюса на экватор, они по-прежнему будут адекватно сравнивать массы. Хотя на экваторе земное притяжение слабее, чем на полюсах, а из-за вращения Земли ускорение земной поверхности направлено к ее центру, на весы это никак не влияет. В медицинских учреждениях и для взвешиваний перед спортивными соревнованиями используются именно рычажные весы — точные и нечувствительные к местным условиям.

Однако при работе с простейшими рычажными весами перед нами встают две проблемы. Во-первых, расстояние от взвешиваемого предмета до опоры и расстояние от разновесов до точки опоры должны быть абсолютно одинаковыми. Если эти расстояния хотя бы чуть-чуть различаются, то даже равные веса на обоих плечах не создадут равных и противоположно направленных моментов сил, и возникнет ошибка в измерениях. Во-вторых, необходимо всегда иметь под рукой эталон (например, набор разновесов) с той же массой, что и масса взвешиваемого тела. Это, конечно, очень неудобно, если вам приходится постоянно измерять то очень большой, то очень малый вес — скажем, вы поочередно взвешиваете человека, грузовик и муху.

Начнем с расстояния предметов до точки опоры. Равную удаленность обоих грузов от этой точки проще всего обеспечить с помощью двух подвесных чаш (рис. 3.1.9). Они крепятся к коромыслу в фиксированных точках, которые расположены на одном и том же расстоянии от точки опоры. Теперь, как бы вы ни расположили взвешиваемый груз в чаше, она будет колебаться, пока центр массы объекта не сосредоточится точно под местом крепления чаши к коромыслу.

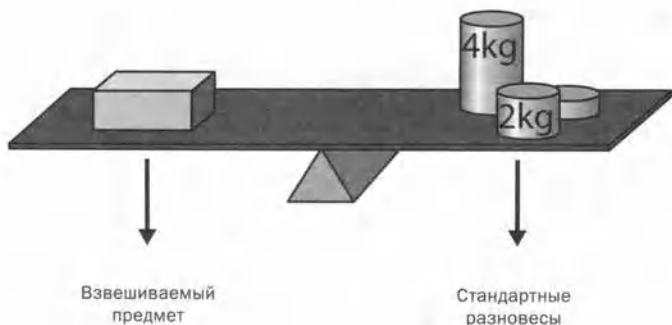
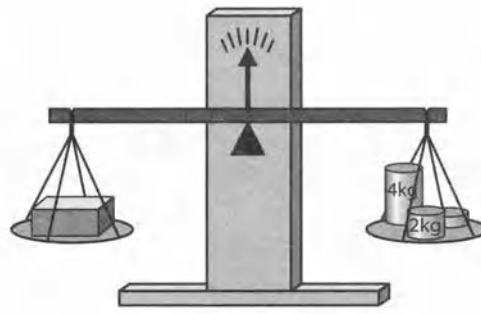
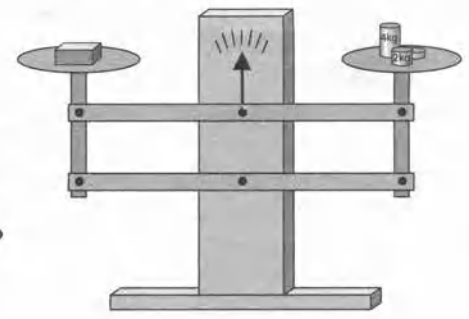


Рис. 3.1.7. И космический корабль, и его команда находятся в одном и том же состоянии свободного падения, поэтому взвесить astronautа обычным способом невозможно. Но с помощью такого аппарата можно воздействовать на astronautа с известной силой и измерить его ускорение.

Рис. 3.1.8. Если тела расположены на равном удалении от точки опоры, коромысло весов будет сбалансировано только тогда, когда взвешиваемый предмет будет иметь тот же вес, что и разновесы. Поскольку вес пропорционален массе, взвешиваемый предмет и разновесы должны иметь также одинаковую массу. В данном случае взвешиваемый предмет имеет массу 7 кг и весит 68,6 Н.



**Рис. 3.1.9.** В состоянии равновесия вес и масса груза на левой чашке рычажных весов равны весу и массе гирь на правой чашке. Чашки колеблются до тех пор, пока их центры тяжести не установятся ровно под точками крепления подвесов к коромыслу.



**Рис. 3.1.10.** Весы Роберваля уравниваются, если равны веса грузов слева и справа. В таком случае работа, необходимая для подъема одной чашки, равна работе, которую совершает опускающаяся чашка.

Такое автоматическое центрирование существенно повышает точность измерений. Дело в том, что центр тяжести груза, расположенный непосредственно под точкой подвеса, находится в самой низкой возможной точке, какую только допускает крепление чаши. Поэтому общая потенциальная энергия чаши также минимальна.

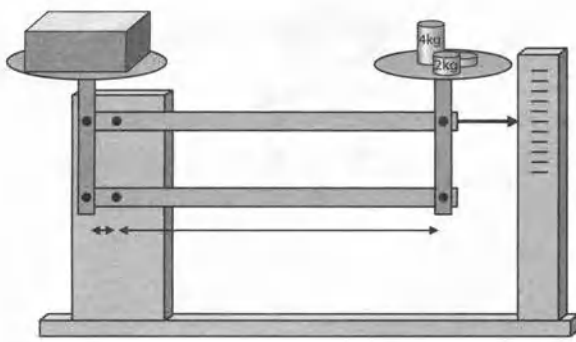
Если мы теперь качнем чашу весов, то центр тяжести груза приподнимется и общая потенциальная энергия возрастет. Поскольку ускорение тела направлено так, чтобы потенциальная энергия уменьшалась как можно быстрее, ускорение чаши обязательно будет направлено к центру — и, достигнув положения, в котором центр тяжести груза будет находиться точно под точкой подвеса, чаша потеряет ускорение вовсе. Центрированная чаша находится в состоянии устойчивого равновесия. Когда вы кладете на нее груз, она может немного покачаться и довольно скоро вновь остановится, так чтобы центр тяжести чаши вместе с грузом оказался под точкой подвеса. Этот эффект находит свое применение в технике (см. ❶).

Теперь нам понятно, почему весы с подвесными чашами более точные. Независимо от того, как расположен груз на чаше, она сместится таким образом, чтобы центр тяжести этого единого объекта расположился на вертикали под креплением подвеса к коромыслу. Точность измерения зависит только от места фиксации чаши, но не от груза. Более 7000 лет назад египтяне уже пользовались рычажными весами, хотя опора, на острие которой балансируют весы, — более позднее римское усовершенствование.

В 1669 году французский математик Жиль Персонн Роберваль (1602–1675) изобрел еще один способ, который позволяет устранить влияние размещения груза на точность взвешивания. Механизм Роберваля имеет два независимых рычага, закрепленных так, чтобы при любом их наклоне равноудаленные чашки всегда оставались в горизонтальном положении (рис. 3.1.10). Когда рычаги поворачиваются, чашки перемещаются строго по вертикали, но в противоположных направлениях. При равенстве веса (и массы) грузов на обеих чашках опускающаяся чашка совершает работу по перемещению рычага, равную той работе, что совершает поднимающаяся чашка. Раз вся работа компенсирована, ускорения не возникает и весы уравниваются. Если вес (и масса) грузов на двух чашках различаются, одна из них приобретает ускорение, направленное вниз. Подобное явление мы наблюдали на примере качелей в разделе 2.1: качели уравниваются только тогда, когда работа, необходимая для подъема одного ребенка, равна работе, совершенной за счет опускания другого.

Механизм Роберваля помогает решить и вторую проблему — теперь нам необязательно нужен эталон или набор разновесов той же массы, что и масса взвешиваемого объекта. Если в весах Роберваля сдвинуть точку опоры из середины, они уравниваются при равенстве произведения масс обоих грузов на соответствующее плечо. Например, если правое плечо рычага в 10 раз длиннее ле-

❶ Строители, возводя здание, выверяют вертикаль с помощью тяжелого свинцового отвеса, подвешенного на тросе. Трос с грузом представляют собой единое тело, центр тяжести которого находится внутри груза. Чтобы общая потенциальная энергия этого тела была минимальной, груз должен прийти в состояние устойчивого равновесия, при котором центр тяжести окажется прямо под точкой подвешивания. Направление троса строители считают вертикальным. Если вы захотите повесить объект какой-то более сложной формы — скажем, люстру или портьеру, — закрепив их не в центре масс, то этот объект все равно примет такое положение, чтобы его центр тяжести расположился под точкой подвеса.



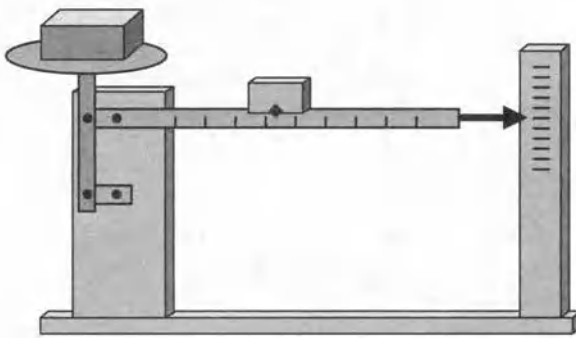
**Рис. 3.1.11.** Подобная разновидность весов Роберваля позволяет взвешивать тяжелые объекты с помощью легких гирек. Поскольку расстояние от точки опоры до правой тарелки в 10 раз больше, чем до левой, весы уравниваются, если груз слева будет в 10 раз тяжелее, чем вес гирек справа. Чтобы весы и без нагрузки были уравновешены, левая тарелка должна быть сама по себе тяжелее правой.

вого (рис. 3.1.11), то для достижения равновесия надо, чтобы масса левого груза в 10 раз превышала массу правого груза. Как и ранее, весы уравновешены при полностью сбалансированном обмене энергией между телами, но в данном случае используется выигрыш в силе. Правый груз перемещается по вертикали в 10 раз больше, чем левый, хотя его вес составляет лишь 1/10 часть веса последнего. Весы уравниваются, потому что работа опускающегося тела целиком идет на подъем другого тела.

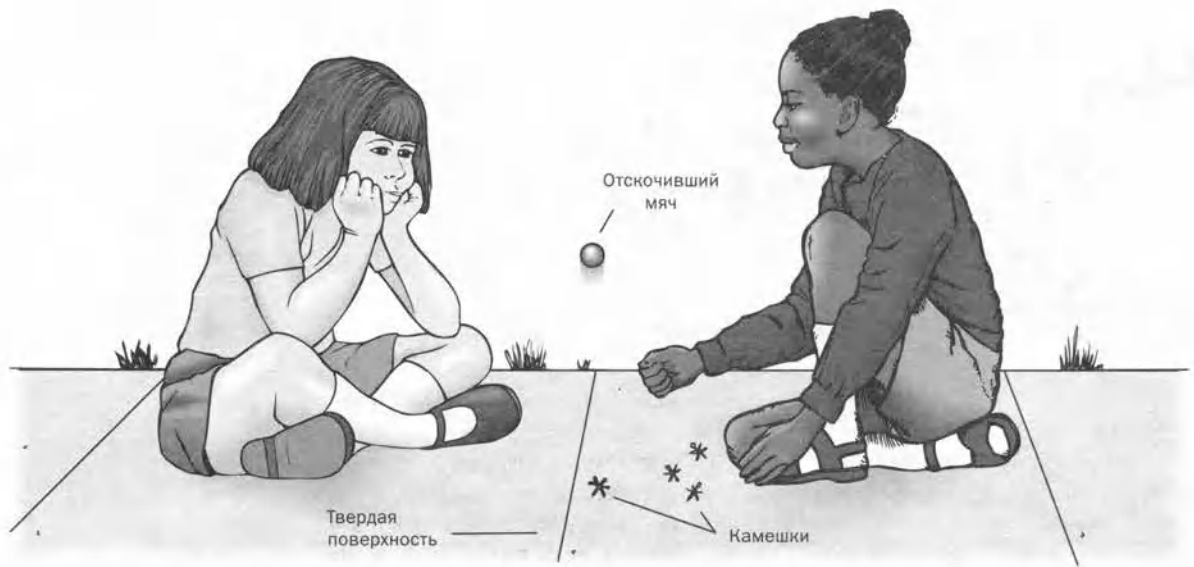
Существует еще много других разновидностей весов. В них применяются различные способы борьбы с влиянием местоположения груза на чаше весов и нередко используется выигрыш в силе для удобства взвешивания очень крупных и очень мелких объектов.

Иногда при взвешивании одновременно используются разновесы и выигрыш в силе, то есть изменение расстояния от точки опоры (рис. 3.1.12). Так, например, устроены медицинские весы. Вы передвигаете по линейке три грузика с разными массами, пока ваш вес не придет в равновесие с ними. Собственную массу вы можете определить по положению грузиков. В некоторых моделях выигрыш в силе со стороны грузиков учитывается автоматически, и вы просто видите свой вес на шкале. Грузы качаются на механических рычагах, и передвигать их вручную не требуется.

Иногда рычаг весов удерживается в горизонтальном положении за счет очень малых возвращающих моментов. Без этих добавочных моментов сил рычаг сбалансированных весов не имеет углового ускорения — он может быть неподвижен и горизонтален, но это вовсе не обязательно. Достаточно очень слабого воздействия моментов сил, чтобы почти уравновешенный рычаг принял горизонтальное положение. Хотя добавочные моменты сил несколько снижают чувствительность весов, благодаря им проще определить, когда весы практически уравновешены.



**Рис. 3.1.12.** В этой версии весов Роберваля для определения веса и массы опытного образца используется один подвижный груз. При пустой тарелке весы уравниваются, когда подвижный груз находится на левой отметке. На этом рисунке на тарелке лежит некий предмет, и чтобы получить выигрыш в силе, надо отодвинуть грузик дальше от точки опоры. Когда весы уравниваются, по положению груза можно определить вес и массу взвешиваемого объекта.



## 3.2 Отскок мяча

Зайдите в магазин игрушек или спортивных товаров, и вы увидите множество мячей — чуть ли не в каждой спортивной игре используется собственная разновидность. Мячи различаются не только размерами и весом. Одни из них жесткие, другие мягкие, одни гладкие, другие шершавые или рифленые.

Но нас в этом разделе будет интересовать лишь одно свойство мяча — его способность к отскоку. Например, лучше всего скачет мячик-«прыгунчик», а мяч из вспененной резины почти вовсе не прыгает. Даже одинаковые с виду мячи могут различаться прыгучестью — новый теннисный мячик отскакивает после удара гораздо лучше, чем старый. Начнем с рассмотрения этой особенности.

### Отскок мяча: мяч как пружина

Мячи и различные шарики замечательны во многих отношениях. Не будь мячей, что стало бы со многими видами спорта? Как работали бы самые разные машины, если бы шарикоподшипники не предохраняли их движущиеся части от износа в результате истирания? Мячи и шарики приносят нам пользу и доставляют радость благодаря своей простой форме и предсказуемым траекториям движения, а также из-за своей прыгучести. Как правило, мяч имеет вид шара, то есть в отсутствие внешних воздействий он принимает равновесную сферическую форму. Но некоторые мячи, например для американского футбола и регби, в состоянии равновесия не круглые, а вытянутые.

С понятием равновесной формы мы уже встречались в предыдущем разделе, когда говорили о пружинах. Это не случайное совпадение, ибо сферический мяч во многом подобен пружине. Действительно, все, что мы знаем о пружинах, в той или иной мере справедливо и для мячей. Так, если вы надавите на мяч, он отзовется приложенной к вашей руке или ноге силой упругости, направленной наружу. Когда вы совершаете работу по деформации мяча, он частично превращает эту работу в свою потенциальную энергию упругой деформации, а как только вы позволите ему восстановить прежнюю равновесную форму, эта накопленная энергия высвободится.

Сходство с пружиной становится особенно явным при ударе мяча об пол или при ударе биты по мячу. В момент соударения поверхность мяча деформируется и запасается потенциальная энергия, которая высвобождается во время отскока. Если мяч летит, часть этой энергии берется из его кинетической энергии. Если он ударяется о движущуюся поверхность, эта энергия частично берется из кинетической энергии поверхности. При отскоке основная доля запасенной энергии вновь принимает форму кинетической энергии мяча и поверхности.



Одни мячи более прыгучие, чем другие. Давайте назовем мяч, который прыгает очень хорошо, “живым”, а тот, что отскакивает более лениво, — “мертвым”. О “живости” можно судить по кинетической энергии до и после отскока. Для этого мы выделим две стадии упругого удара — соударение и отскок (рис. 3.2.1). При соударении мяч и поверхность, о которую он ударился, превращают часть своей общей кинетической энергии в потенциальную энергию упругой деформации и в тепловую энергию. При отскоке мяч и поверхность взаимно отталкиваются, потенциальная энергия упругой деформации переходит обратно в кинетическую и тепловую энергию. Суммарная кинетическая энергия, которая высвобождается при отталкивании мяча от поверхности, и есть энергия отскока.

“Живой” мяч — максимально упругий: при ударе энергия соударения почти полностью превращается в потенциальную энергию упругой деформации, а последняя, в свою очередь, при отскоке почти полностью переходит в энергию отскока. С другой стороны, “мертвый” мяч практически лишен упругости — при ударе основная доля энергии соударения переходит в тепловую, а основная доля оставшейся энергии превращается в тепловую при отскоке (рис. 3.2.2).

Высота, на которую подпрыгнет мяч, ударившись о твердый пол, если выроните его из состояния покоя (рис. 3.2.3), определяется отношением энергии отскока к энергии соударения (таб. 3.2.1). Для абсолютно упругого мяча это отношение равно 1, и он должен подняться на ту же высоту, с которой упал (в действительности мяч теряет часть энергии соударения и взлетает на чуть меньшую высоту). Высота, с которой он упал, пропорциональна его исходной потенциальной энергии, а стало быть, и энергии соударения. Высота, на которую мяч вновь взлетает, также пропорциональна энергии отскока. Следовательно, отношение этих двух высот может служить надежным критерием отношения энергии отскока к энергии соударения. Чем оно меньше (таб. 3.2.1), тем меньше кинетическая энергия, которую получает мяч при отскоке, и тем слабее отскок.

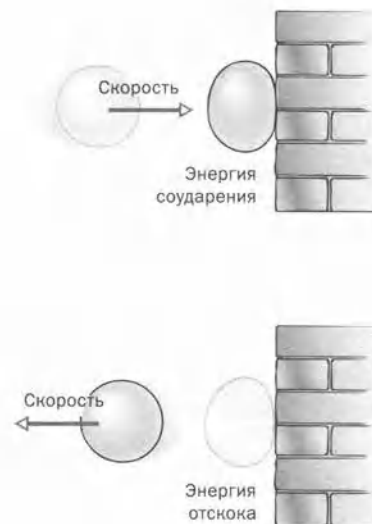


Рис. 3.2.1. Удар мяча о стену можно разложить на две стадии — соударение (а) и отскок (б). При соударении мяча со стенкой часть их кинетической энергии переходит в другие виды энергии (эта часть называется энергией соударения). При отскоке накопленная энергия частично высвобождается в виде кинетической — и эта порция называется энергией отскока. Энергия отскока всегда меньше энергии соударения, потому что какая-то часть теряется в виде тепловой энергии. Но “живой” мяч теряет меньше энергии, чем “мертвый”.

Таблица 3.2.1. Примерное соотношение энергий и коэффициенты восстановления для разных мячей и шариков

Тип мяча	Энергия отскока /энергия соударения	Коэффициент восстановления
Мячик-прыгунчик	0,81	0,90
Мяч для ракетбола	0,72	0,85
Мячик для гольфа	0,67	0,82
Теннисный мяч	0,56	0,75
Шарик подшипника	0,42	0,65
Бейсбольный мяч	0,30	0,55
Мяч из губчатой резины	0,09	0,30
Неупругий мяч	0,01	0,10
Мягкая игрушка, заполненная полистироловыми шариками	0,002	0,04

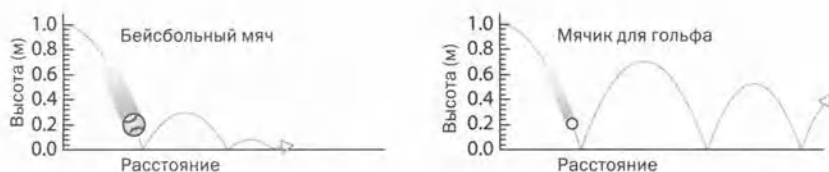


Рис. 3.2.3. Бейсбольный мяч теряет 70% энергии соударения в виде тепловой энергии и отскакивает плохо. Напротив, мячик для гольфа теряет всего 30% энергии соударения и отскакивает хорошо.

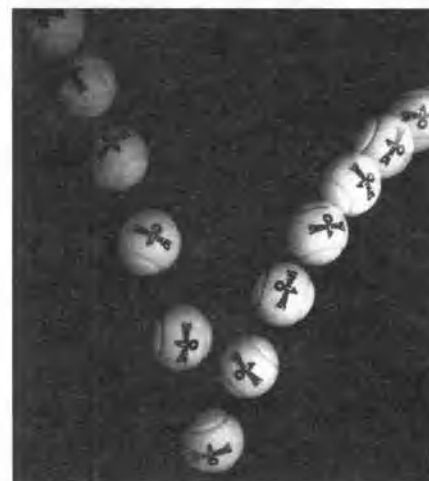


Рис. 3.2.2. Ударившись об пол, теннисный мячик сминается и запасает энергию, а после отскока летит чуть медленнее, чем до соударения. Здесь показано положение мяча в 12 точках через равные промежутки времени. Куда отскочил мяч — влево или вправо? Как это определить?

Отношение энергий — весьма полезный параметр, однако мячи принято оценивать по коэффициенту восстановления — отношению скорости отскока к скорости в момент соударения, при условии что мяч отскакивает от твердой, неподвижной поверхности:

$$\text{коэффициент восстановления} = \text{исходящая скорость мяча} / \text{входящая скорость мяча} \quad (3.2.1).$$

Ученые обнаружили, что для большинства мячей в широком интервале скоростей соударения это соотношение постоянно. Коэффициент восстановления мяча, который отскакивает с той же скоростью, с какой ударился о поверхность, равен 1,00. Мячик-“прыгунчик” обладает почти такой “живостью” — его коэффициент восстановления составляет примерно 0,90. То есть, ударившись о бетонную стенку на скорости 10 км/ч, он отлетит со скоростью около 9 км/ч. В противоположность ему шарик из губчатой резины имеет коэффициент восстановления 0,30, а набитая полистироловыми шариками или пенорезиной игрушка — чуть ли не нуль.

В действительности между соотношением энергий и коэффициентом восстановления существует прямая зависимость. Напомню — кинетическая энергия мяча равна половине произведения массы на квадрат скорости. Даже если неизвестны массы мячей, мы знаем, что соотношение энергий равно квадрату отношения скоростей. Следовательно, если мягкий резиновый мячик отскакивает со скоростью, составляющей 0,30 его скорости в момент удара, от его первоначальной кинетической энергии сохранится всего лишь 0,30<sup>2</sup> (0,09), или 9%, а остальные 91% перейдут в тепловую энергию резины и наполняющего ее воздуха. А вот “прыгунчик” после отскока сохранит 81% исходной кинетической энергии.

Мячи обладают большей прыгучестью, если они запасают энергию не за счет деформации поверхности, а за счет сжатия самого мяча. Дело в том, что в материалах, из которых по большей части изготавливают мячи, таких как кожа и имитирующие кожу пластики, при искривлении поверхности обычно возникает довольно сильное внутреннее трение, что очень расточительно. Мячи и шары из сплошного материала, будь то резина, дерево, пластик или упругая сталь, при ударе подвергаются сжатию и, как правило, прыгают очень хорошо. А полые мячи упруги только в том случае, если их туго накачать. Обычный баскетбольный мяч запасает энергию большей частью в сжатом воздухе, которым он накачан, и у него высокий коэффициент восстановления. Но плохо надутый баскетбольный мяч, поверхность которого при ударах сильно деформируется, вообще почти не прыгает. По той же причине новые теннисные мячи — самые упругие; со временем сжатый воздух постепенно просачивается через оболочку наружу, и в конце концов коэффициент восстановления мяча уменьшается.



**Рис. 3.2.4.** При отскоке теннисного мяча от движущейся ракетки и она сама, и оболочка мяча прогибаются и делят между собой энергию соударения. Однако на самом деле ракетка более эластична, чем мяч, и накопление большей доли энергии соударения в слабо натянутой ракетке приводит к более высокой скорости отскока мяча. Если ракетка натянута слабо, то расплатой за эту прибавочную скорость может стать ухудшение контроля над углом отскока; сильный игрок, для которого важна точность, предпочтет ракетку с тугими струнами.

## Влияние поверхности удара на отскок мяча

Поскольку поверхность, о которую стучается мяч, не абсолютно твердая, она участвует в процессе отскока. При соударении она тоже деформируется и запасает энергию, часть которой возвращается к отскакивающему мячу. В результате мяч и поверхность удара делят энергию соударения на двоих, ведут себя как пружины и вносят свой вклад в энергию отскока.

Распределение энергии соударения между мячом и поверхностью удара зависит от жесткости обоих. При отскоке они отталкиваются друг от друга с равными и противоположно направленными силами. Раз вдавливающие силы равны, работа при деформации мяча и поверхности удара пропорциональна степени деформации. То тело, которое деформируется сильнее, принимает более значительную часть энергии соударения.

Поскольку мяч обычно деформируется сильнее поверхности, с которой он сталкивается, то ему достается большая часть энергии соударения. Поэтому логично ожидать, что и в энергии отскока его доля тоже будет больше. Однако так бывает не всегда. Некоторые очень упругие поверхности весьма эффективно запасают энергию соударения и почти полностью возвращают ее в виде энергии отскока. Менее прыгучий мяч теряет большую часть полученной энергии соударения, поэтому вклад упругой поверхности удара в энергию отскока может быть довольно велик. В теннисе упругость ракетки очень важна, потому что при ударе

по мячу ее струны обеспечивают значительную часть энергии отскока (рис. 3.2.4). Еще более яркие примеры — батут и трамплин, упругие настолько, что способны подбросить человека. Тело человека с точки зрения упругости похоже на мягкую игрушку, наполненную полистироловыми шариками: его коэффициент восстановления близок к нулю; когда вы подпрыгиваете на батуте, именно он получает и запасает основную часть энергии соударения, а затем обеспечивает основную часть энергии отскока.

Силы воздействия обоих тел друг на друга и, следовательно, длительность (быстрота) акта соударения также определяются жесткостью мяча и поверхностью удара. Твердое тело лучше сопротивляется деформации, чем мягкое. Если оба тела очень твердые, силы взаимного воздействия велики и ускорение тоже велико. Следовательно, стальной шарик отскочит от бетонного пола с очень высокой скоростью, потому что с обеих сторон возникают большие силы. Если шарик (мяч) и/или поверхность удара относительно мягкие, возникают менее значительные силы и ускорение будет меньше.

А что, если мяч ударится о тело с небольшой массой? В таком случае поверхность последнего хотя бы чуть-чуть, но тоже "отскочит". При отскоке мяч и поверхность приобретают противоположно направленное ускорение и делают энергию отскока. Ускорение массивной поверхности — скажем, пола или стены — мало, и энергии отскока такой поверхности почти не достается. Но если мяч стукнется о менее массивную поверхность, вы заметите, что и она приобретает ускорение. Мяч, угодивший в лампу на журнальном столике, примет на себя основную долю ускорения, но и лампа, скорее всего, не устоит (см. ❶).

Точно так же бейсбольная бита и мяч приобретают в момент удара противоположно направленные ускорения. Чем массивнее бита, тем меньше ее ускорение. Для того чтобы основная часть энергии отскока перешла к мячу, лучшие игроки начала XX века пользовались тяжелыми битами. Сейчас такие биты вышли из употребления, потому что ими слишком трудно замахиваться. Однако на заре бейсбола тяжелые биты обеспечили множество зрелищных ударов.

## Влияние движущейся поверхности на отскок мяча

Только что акт соударения бейсбольного мяча с движущейся битой рассматривался как случай "отскока". Пожалуй, звучит не совсем понятно. При ударе о неподвижную битку мяч отскакивает. А если движущаяся бита ударит по неподвижному мячу, можно ли говорить об отскоке мяча?

Можно. На самом деле, какое тело движется, а какое покоится, зависит от вашей точки зрения, то есть от вашей инерциальной системы отсчета. Мухе, которая сидит на мяче, кажется, что он не движется и что сейчас по нему ударит движущаяся бита. Другая муха сидит на бите и думает, что это бита покоится, а сейчас в нее врежется летящий мяч. У которой из мух инерциальная система отсчета более правильная?

Как мы уже говорили в разделе 1.1, обе системы отсчета равноправны. Инерциальная система отсчета не имеет ускорения, то есть покоится или движется с постоянной скоростью. До тех пор пока вы смотрите на мир из инерциальной системы отсчета, законы механики адекватно описывают все, что вы видите, и энергия, импульс и момент импульса подчиняются законам сохранения.

Но во время бейсбольного матча система отсчета — не главное, что вас интересует. Замахиваясь битой и посылая мяч в поле, вы больше всего озабочены тем, как быстро мяч полетит в сторону трибун. Быстрый мяч обеспечит хоумран, а медленный — проигрыш. От чего же зависит скорость полета мяча?

Поскольку и бита, и мяч перемещаются относительно игрового поля, рассматривать соударение можно из разных инерциальных систем отсчета. Но нам удобнее сосредоточиться на скорости удаления биты и мяча друг от друга. В большинстве случаев соударения важно именно это относительное перемещение. В конце концов, бутылка ли ударится о камень, или камень врежется в бутылку — все едино, ничего хорошего не получится.

При отскоке мяча от твердой и массивной движущейся поверхности по-прежнему имеет значение коэффициент восстановления. Но теперь мы должны воспользоваться более общим уравнением для отношения скоростей. В таком его

❶ Взаимодействие конкретного мяча с той или иной целью зависит от его "живости". Если бросить в стену бинбэг (мягкий пуф-мешок, набитый гранулами наполнителя), он тут же прекратит свой полет, как только достигнет цели и сообщит весь свой направленный вперед импульс поверхности соударения. А мячик-прыгунчик, попав во что-нибудь, упруго отскочит, так что переданный импульс почти удвоится. Поэтому, пытаясь сбить мишень на аттракционе в парке развлечений, лучше всего это делать именно с помощью "прыгунчика", который отдаст увеличенный импульс. По той же причине выбить дверь гораздо легче тараном с резиновым наконечником, чем таким, у которого на конце мешок с песком.

виде скорость, с которой мяч и поверхность “разлетаются” после отскока, делится на скорость их сближения до отскока:

$$\text{коэффициент восстановления} = \frac{\text{скорость удаления}}{\text{скорость сближения}} \quad (3.2.2).$$

Для неподвижной поверхности равенство 3.2.2 эквивалентно равенству 3.2.1.

Чтобы понять, как это обобщение помогает объяснить, почему отбитый вами мяч летит над головой центрального принимающего игрока, надо проанализировать соударение мяча с битой. Допустим, после подачи мяч, прежде чем удариться о битку (рис. 3.2.5, а), приближается к основной базе со скоростью 100 км/ч. Вы, хорошенько размахнувшись, готовитесь отразить удар, и ваша битка движется в сторону питчера тоже со скоростью 100 км/ч. Поскольку оба тела движутся навстречу друг другу, скорость их сближения равна сумме скоростей каждого из них, то есть 200 км/ч.



Рис. 3.2.5. (а) До соударения мяч и битка сближаются с общей скоростью 200 км/ч. (б) После соударения они удаляются друг от друга с другой скоростью — 110 км/ч. Однако поскольку битка движется к питчеру со скоростью 100 км/ч, мяч улетает в том же направлении со скоростью 210 км/ч.

Коэффициент восстановления бейсбольного мяча равен 0,55, поэтому после соударения (рис. 3.2.5, б) скорость удаления составит всего 0,55 скорости сближения, или 110 км/ч. Улетающий мяч и битка удаляются друг от друга со скоростью 110 км/ч. Если битка все еще движется в сторону питчера со скоростью 100 км/ч, мяч должен лететь в ту же сторону еще быстрее — со скоростью (100 км/ч + 110 км/ч), то есть его полная скорость составляет 210 км/ч! Вот почему мяч летит напрямиком на трибуну, минуя игроков в дальней части поля.

### Поверхность удара тоже отскакивает... а также гнется и закручивается

Как видите, движение поверхности удара оказывает существенное влияние на отскок мяча. Поверхность, которая движется навстречу подлетающему мячу, усиливает отскок, а та, что удаляется, ослабляет его. Но мы не учитываем воздействие мяча на поверхность удара. А ведь она тоже иногда отскакивает!

Объект нашего внимания — бейсбольный мяч. Вы размахнулись, ударили по брошенному питчером мячу, но битка движется не так, как раньше. В момент соударения мяч толкает битку, и она реагирует удивительным образом.

Во-первых, как мы уже отметили, битка отскакивает от мяча. В процессе соударения она слегка замедляет ход, так что после удара ее скорость несколько меньше, чем до него. Поскольку конечная скорость мяча зависит от конечной скорости биты, замедление биты влечет за собой потерю скорости мяча. Значит, мы переоценили скорость полета мяча к верхним рядам трибуны.

Во-вторых, удар мяча заставляет битку вращаться. Мяч толкает битку и сообщает ей направленное назад ускорение, а кроме того, создает момент силы, который закручивает битку относительно ее центра масс и придает ей угловое ускорение

Рис. 3.2.6. При соударении с мячом битка приобретает линейное и угловое ускорения. (а) Если мяч попадает в битку ближе к ее середине, угловое ускорение незначительно, и рукоятка приобретает линейное ускорение, направленное назад. (б) Если удар приходится на конец биты, ее угловое ускорение велико, и ускорение рукоятки направлено вперед. (в) А если мяч попадет в центр удара, угловое ускорение будет как раз таким, чтобы рукоятка вовсе не имела никакого ускорения.

(рис. 3.2.6). Несмотря на то что эти два ускорения не так уж велики, ваши руки ощущают их воздействие. Линейное ускорение посылает рукоятку биты в сторону принимающего игрока, в то время как угловое ускорение способствует повороту ручки в сторону питчера. Интенсивность этих двух воздействий мяч зависит от того, в какой точке биты произойдет соударение ее с мячом. Если он попадет в так называемый центр удара, рукоятка вообще не будет иметь ускорения (рис. 3.2.6, в). Эта точка, так называемая точка комфорта, отстоит от конца биты примерно на 18 см.

И наконец, удар нередко вызывает вибрацию биты. Словно клавиша ксилофона, по которой ударили палочкой (рис. 3.2.7, а), бита быстро изгибается то назад, то вперед, причем ее концы и середина движутся в противоположных направлениях (рис. 3.2.7, б). От этих колебаний больно рукам, а деревянная бита может даже сломаться. Но ближе к обоим ее концам есть точки, в которых не происходит никакого движения при колебаниях биты, — так называемые узлы колебаний.



Рис. 3.2.7. (а) Удар палочки вызывает вибрацию клавиши ксилофона, причем ее концы и середина движутся вперед и назад в противоположных направлениях. Область максимального смещения называется пучностью, а неподвижные точки — узлами. (б) Удар по мячу вызывает точно такие же колебания биты. Но если мяч попадет в узел, колебаний не возникнет.

При попадании мяча в эту точку бита не вибрирует. Более того, слышится звонкий щелчок, и мяч летит дальше, чем обычно. К счастью, узел колебания почти совпадает с центром удара, поэтому это самая выгодная для удара точка биты.

Судя по движениям и колебаниям ручки, научно обоснованный расчет и конструирование биты — чрезвычайно тонкое дело. Поэтому производители бейсбольных бит неустанно ищут новые, более эффективные решения. Как и их коллеги, которые выпускают клюшки для гольфа, теннисные ракетки, инвентарь для боулинга и бильярдные столы, они мечтают об идеальном отскоке с полным поглощением энергии соударения и полным ее возвратом в виде энергии отскока. Такие идеальные соударения — их называют упругими — типичны для крошечных атомов газа, но с обычными телами происходят редко: слишком много путей расходования и рассеяния энергии — на тепло, звук, колебания и свет.

Хотя производители вынуждены работать с неупругими соударениями, при которых не удастся всю энергию соударения обратить в энергию отскока, с каждым годом заветная цель становится ближе. Кроме того, они уже приближаются к пределам, которые допускаются правилами, а случалось, в стремлении к максимальной эффективности даже выходили за эти пределы (подробнее об этом см. 2).

Сейчас на вооружении бейсболистов имеются многослойные биты из алюминия, титана и композитных материалов. Полые биты достаточно мягки для того, чтобы их поверхность деформировалась при контакте с мячом и получала большую часть энергии соударения. Круглый цилиндр сплющивается и приобретает овальное сечение, прекрасно запасает энергию соударения, после чего вновь расправляется синхронно с этапами отскока. Тонкая и легкая внешняя стенка высокотехнологичной биты сохраняет лишь малую долю энергии отскока. В отличие от твердой поверхности деревянной биты, которая почти не прогибалась и потому почти не участвовала в процессе накопления энергии, современная бита подобна trampolinu — она запасает и отдает настолько высокую энергию соударения, что существенно повышает скорость улетающего после удара мяча. Не менее “умное” спортивное снаряжение вы увидите и на теннисном корте, и в гольф-клубе. Мы живем в эпоху, когда наука и инженерия колоссально меняют характер многих видов спорта.

2 Задолго до того, как в спорт пришли высокие технологии, бейсболисты нелегально модифицировали свои деревянные биты, надеясь, что удар станет более мощным. Один из самых известных способов — так называемый коркинг, когда у биты выдалбливали середину и заполняли полость более легкой пробкой. Несмотря на хитроумие этого незаконного приема, ряд американских ученых, в том числе физики Роберт Адер, Алан Нейтан, Дэн Рассел и Ллойд Смит, пришли к выводу, что он не давал игрокам сколько-нибудь заметных преимуществ, которых нельзя было бы добиться, не нарушая правил — просто подобрав более легкую, короткую и тонкую биту.



**Рис. 3.2.8.** Игрок в пул направляет кием белый шар-биток по сукну стола, так что биток стучается о цветной прицельный шар и забивает его в лузу. Игрок посредством кия передает битку и прицельному шару импульс и энергию. Бильярдные шары наглядно иллюстрируют законы механики, поэтому физики любят проводить аналогии с “физическими законами бильярда”.

В бейсболе играют одним мячиком, а, скажем, в бильярде, пуле и кркете задействовано сразу много шаров (3.2.8). Мало того, эти шары постоянно ударяются друг о друга с неожиданными результатами. Когда в бильярде или пуле движущийся биток (шар, по которому наносят удар кием) ударяется в другой шар, то они словно обмениваются движениями — биток останавливается, а второй шар катится туда, куда его направили (рис. 3.2.9). Аналогичный прием в кркете называется “высылкой”: вы сильным ударом направляете свой шар прямо в шар противника, и происходит обмен — ваш шар останавливается, а второй “высылается” за пределы поля. Почему так происходит?

В обоих случаях шары действуют друг на друга с равными и противоположно направленными силами, тем самым обмениваясь импульсами и энергией. Сталкиваясь друг с другом в течение какого-то времени, шары обмениваются импульсами — приходящий шар передает уходящему направленный вперед импульс. Толкая друг друга и перемещаясь вперед, шары обмениваются энергией — приходящий шар при поступательном движении передает уходящему кинетическую энергию. И если первый шар отдаст второму весь свой импульс и всю кинетическую энергию, очевидно, второй шар начнет двигаться так, как двигался первый; первый шар после соударения остановится, а второй покатится вперед на предназначенное ему место.

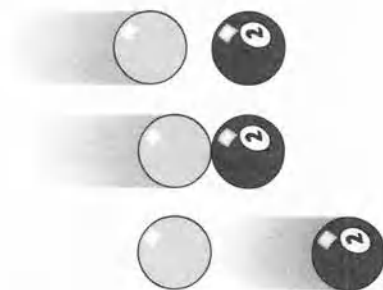
Однако такой идеальный обмен возможен только при равенстве масс и абсолютной упругости обоих шаров — они должны иметь коэффициент восстановления 1. Если массы шаров равны, то согласно закону сохранения импульса направленная вперед скорость прицельного шара (то есть того, по которому выполняется удар битком) должна возрасти на ту же величину, на которую уменьшится направленная вперед скорость битка. Если шары абсолютно упругие, то по закону сохранения энергии их общая кинетическая энергия при поступательном движении должна быть такой же, как до соударения. Эти два условия могут быть соблюдены одновременно только в том случае, если биток отдаст второму шару всю свою кинетическую энергию и импульс. Следовательно, при соударении двух абсолютно упругих шаров одинаковой массы происходит полный обмен движением.

Даже если шары не совсем идентичны по массе и не абсолютно упруги, а удар не безупречно прямой, они все равно достаточно хорошо обмениваются энергией и импульсами. Им даже необязательно быть шарами. Попробуйте подтолкнуть монетку по гладкому столу, так чтобы она столкнулась с другой, и вы увидите, как монетки передают друг другу свои параметры движения! Боулинг на траве, шаффлборд, игра в шары (петанк) — во всех этих спортивных играх от переноса энергии и импульса зависит, удастся ли вам “выбить” шар или шайбу противника и поставить на их место собственный снаряд.

Однако подобный, почти идеальный обмен импульсами и энергией — не единственный вариант развития событий, даже если оба шара абсолютно одинаковы и упруги. Бывает и так, что биток на мгновение останавливается, а затем медленно катится вслед за прицельным шаром. Это возобновление движения вызвано фактором, которым я до сих пор пренебрегал, а именно вращением. Закрученный до соударения биток будет вращаться и после удара, и это вращение заставляет его катиться.

Предположим, например, что до удара биток катился вперед. В результате столкновения с другим шаром он теряет свой импульс и кинетическую энергию, однако на момент импульса и на кинетическую энергию вращения удар оказывает меньшее влияние. Биток прекращает поступательное движение, но вращаться не перестает. И подобно колесу гоночного автомобиля в момент старта, он использует трение скольжения, возникающее при контакте с поверхностью (рис. 3.2.10, а), чтобы бросить себя вперед. Биток переводит кинетическую энергию вращения в кинетическую энергию поступательного движения и потихоньку катится вслед за прицельным шаром. Разумеется, послав биток в прицельный шар, вы не на шутку расстроитесь, если биток медленно скатится вслед за шаром в ту же лузу. Однако опытные игроки умеют контролировать не только импульс, но и момент импульса битка.

То, что шар катится вперед, вовсе не означает, что он и вращается вперед. На самом деле, если вы нацелили кий точно в центр битка и сильно ударили, со



**Рис. 3.2.9.** В случае прямого удара битка по неподвижному прицельному шару происходит почти идеальный обмен энергией и импульсами. Прицельный шар катится со скоростью битка, а биток останавливается. Однако в этой простейшей ситуации не учитывается вращение битка.

стороны кия на шар не будет действовать крутящий момент и шар начнет совершать поступательное движение без вращения. Если в момент касания прицельного шара биток не вращается, после соударения он остановится, потому что сам закрутиться вперед он никаким способом не может (рис. 3.2.10, б).

Если шар не крутится, он просто скользит по столу. Таким образом, стол толкает нижнюю точку шара в направлении, обратном ее скорости, за счет горизонтальной силы трения скольжения. Эта сила создает действующий на шар момент, который постепенно переводит скольжение во вращение. Однако сила трения не только заставляет шар вращаться, но и придает ему горизонтально направленное ускорение. Если изначально шар не вращался, то, как было показано в предыдущем абзаце, горизонтальное ускорение будет направлено назад и движение шара мало-помалу замедлится. Но если шар был подкручен ударом кия, то горизонтальное ускорение может быть направлено в любую сторону, и шар способен катиться через весь стол по криволинейной траектории.

Чтобы закрутить шар кием, необходимо соблюдение двух условий: во-первых, удар должен прийтись не по центру шара, и, во-вторых, должно возникнуть трение. Шар круглый, поэтому приложенная к шару сила реакции опоры со стороны кия всегда направлена к его центру и не создает крутящего момента. Чтобы шар в момент удара закрутился, необходимо подтолкнуть его сбоку, приложив силу трения. Чтобы увеличить силу сцепления и создать момент силы, кончик кия натирают мелом. Опытные игроки умеют подкручивать биток именно так, как им требуется, и контролируют направление его скорости, тем самым задавая траекторию его движения по столу до и после столкновения с прицельным шаром.

Если удар кия пришелся выше или ниже центра битка, шар получает соответственно верхнее или нижнее вращение. При верхнем вращении биток просто катится и после прямого попадания в прицельный шар движется вслед за ним (рис. 3.2.10, а). В бильярде удар с верхним вращением логично называется *накатом*. Напротив, при нижнем вращении биток после столкновения с неподвижным прицельным шаром откатывается назад (рис. 3.2.10, в) — это называется *“удар с оттяжкой”*. Удар правее или левее центра, так называемый *боковой винт*, придает битку боковое вращение. В чистом виде боковой винт заставляет шар вертеться волчком на месте и горизонтального ускорения ему не сообщает. Но комбинация бокового винта с *накатом* или *оттяжкой* направляет шар с ускорением по изогнутой траектории.

Самоускорение закрученного шара после соударения используется и в других видах спорта, особенно в кроекте, когда игрок, выбивая шар противника, должен поставить на определенную позицию свой шар. Но еще более широкое применение имеет горизонтальное ускорение в сочетании с переходом поступательного движения во вращательное. Этот эффект часто используется в игровых видах спорта, причем даже в таких, где играют одним мячом.

Горизонтальное ускорение играет важнейшую роль в боулинге. Посланный по дорожке шар очень быстро вращается и одновременно скользит. Ближняя часть дорожки смазана специальным маслом, поэтому сцепление шара с поверхностью слабое, и в основном он движется вперед по инерции. Но затем смазанный участок заканчивается, сцепление усиливается, и скольжение прекращается, зато начинается вращение. Шар катится с горизонтальным ускорением, а его траектория изгибается. Если прицел был точным, то нужным образом закрученный шар попадет в треугольник кеглей сбоку, под углом и шибет их все.

## Еще об отскоке

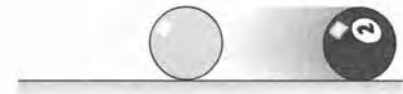
Теперь нам ясно, что куда ни посмотри, все тела отскакивают одно от другого. Вы и не подумаете, что это был отскок, но каждый раз при столкновении двух предметов вы наблюдаете то самое явление, которое мы сейчас изучаем. Прежде чем перейти к следующей теме, я хочу обсудить еще кое-какие случаи, когда отскок играет важную роль, и некоторые его интереснейшие моменты.

Сперва давайте вернемся к бильярду и посмотрим, что будет, если шары не столкнутся; что происходит, когда шар попадает в борт или вообще останавливается на столе? Попадание в борт, судя по всему, должно быть похоже на отскок, поэтому начнем с него.

а) Биток подкручен “накатом” (верхнее вращение)



б) Биток не подкручен



в) Биток подкручен “с оттяжкой” (нижнее вращение)



**Рис. 3.2.10.** Вращение битка до соударения влияет на его дальнейшее движение. (а) В случае *наката* (верхнего вращения) трение о стол придает битку после соударения направленное вперед ускорение, поэтому биток догоняет прицельный шар. (б) Если биток не подкручен, после столкновения с прицельным шаром он остановится. (в) В случае удара с *оттяжкой* (нижнего вращения) после попадания в прицельный шар ускорение битка из-за трения направлено назад, поэтому биток удаляется от прицельного шара.

Стукнувшись о борт под прямым углом (то есть перпендикулярно его поверхности), шар откатывается прямо назад. Как следует из наших прежних рассуждений, в момент соударения шар и борт деформируются, запасают в своих чрезвычайно упругих поверхностях энергию соударения, и большая часть этой накопленной энергии возвращается к шару в виде энергии отскока. Шар отлетает от борта со скоростью и импульсом, направленными в обратную сторону. А поскольку борт бильярдного стола (точнее, резиновая накладка на нем) намного мягче шара, то он проминается гораздо сильнее и накапливает гораздо больше энергии. Пока что мы повторяем пройденное.

А что, если шар попал в борт не под прямым углом? Представим себе на мгновение, что борт абсолютно упругий, — тогда отскок будет зеркальным; шар отразится от борта по другую сторону от перпендикуляра (рис. 3.2.11, а). Так будет потому, что при отскоке меняется направление (на противоположное) только перпендикулярных борту составляющих скорости и импульса. Более того, накапливается и возвращается лишь часть кинетической энергии шара — той, что обусловлена его движением к борту в перпендикулярном направлении. Кинетическая энергия, связанная с параллельным борту компонентом движения, остается в процессе отскока неизменной.

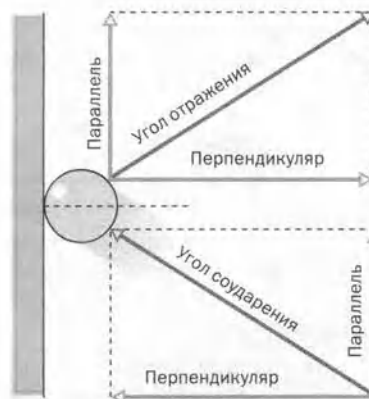
Поэтому, хотя движение шара в направлении, перпендикулярном борту, после отскока сменяется на противоположное, в направлении вдоль борта шар по-прежнему движется с той же скоростью. Поскольку отскок влияет только на перпендикулярный компонент движения шара, а не на параллельный, шар отскакивает от борта под тем же углом, под которым ударился в него.

Однако борт не является абсолютно упругим, поэтому при ударе шар теряет часть кинетической энергии, связанной с его перемещением по нормали к борту. Следовательно, после удара перпендикулярные борту составляющие скорости и импульса шара будут меньше, чем до удара, и угол отражения шара по отношению к перпендикуляру будет больше симметричного угла (рис. 3.2.11, б). Бильярдисты умеют рационально распоряжаться асимметрией отскока, однако они исходят из того, что в любой точке борта и на всех столах отскок происходит одинаково. Производители бильярдных столов придают огромное значение стандартизации бортов и их упругих свойств.

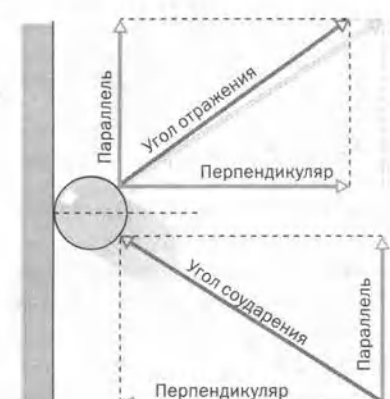
Но я вновь пренебрег вращением шара. В момент удара шара о борт возникает сила сцепления, которая позволяет закрученному шару прокатиться вдоль борта благодаря трению. В зависимости от характера и скорости вращения шара борт действует на него с такой силой трения, которая меняет параллельные борту составляющие скорости и импульса. Шар, которому придали нижнее вращение (рис. 3.2.12, а), отскакивает с меньшей скоростью и под меньшим относительно перпендикуляра углом, чем если бы он не был подкручен. При верхнем вращении (рис. 3.2.12, б) шар отскакивает с более высокой скоростью, и угол между направ-

Рис. 3.2.12. (а) При ударе бита с нижним вращением об абсолютно упругий борт параллельная борту составляющая вектора скорости уменьшается, отскок слабый, чуть ближе к перпендикуляру, чем при ударе без вращения. (б) При верхнем вращении параллельная борту составляющая вектора скорости возрастает, отскок сильный, дальше от перпендикуляра, чем при ударе без вращения. Данная схема иллюстрирует случай абсолютно упругого соударения.

а) Отскок от абсолютно упругого борта



б) Отскок от реального борта





лением отскока и перпендикуляром увеличивается. Искусные игроки используют это явление в своих целях.

В спортивных играх с мячом угол отскока и подкрутка имеют огромное значение. Баскетболисты учитывают их при передаче мяча от пола и принимая мяч при отскоке от щитка или кольца. В гольфе игроки управляют отскоком мячика от поверхности поля. В теннисе, гандболе, сквоше и пинг-понге соперники пытаются обмануть друг друга, подкрутив мяч или шарик. В футболе, бейсболе, хоккее на траве и лакроссе спортсмены следят за тем, под каким углом мяч ударится о поле и как он закручен, и заранее знают, куда он отскочит.

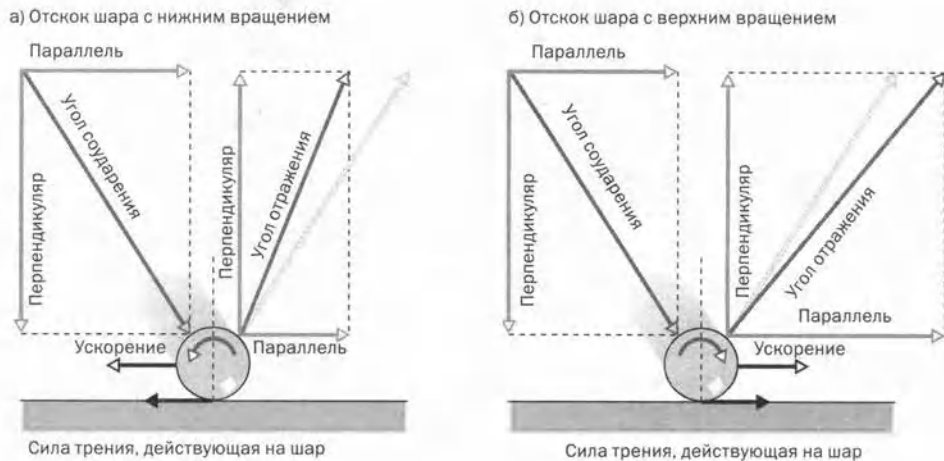
Мы все так привыкли к этим отскокам, что, если мячик — обычно из-за дефектов поверхности — отлетает не туда, куда мы ожидали, мы говорим о “плохом отскоке”. Безусловно, если мяч не имеет формы шара, прогнозировать что-либо трудно. Практически невозможно предвидеть траекторию после удара о землю продолговатого мяча в американском футболе или регби (эти мячи к тому же совершают одновременно поступательное и вращательное движение). Пытаясь успеть за непредсказуемым полетом мяча, игроки смешно размахивают руками и то и дело устраивают кучу-малу, что доставляет нам огромное удовольствие, хотя и заставляет замереть от ужаса, когда на поле “месяц” нашу команду.

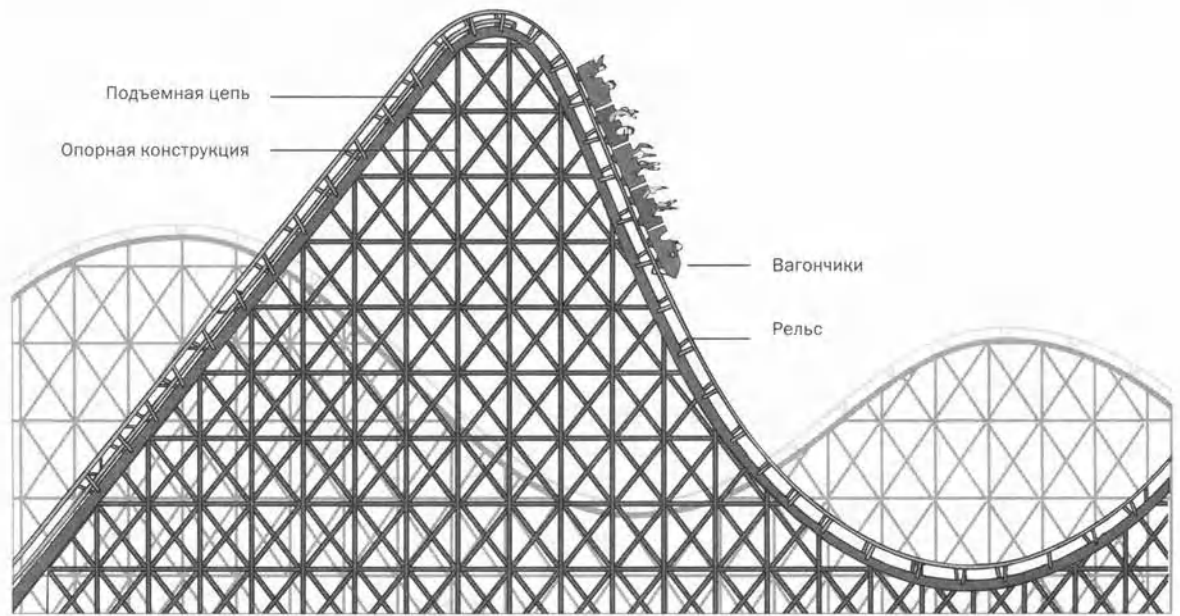
А что, если бильярдный шар вообще никуда не попадет? При чем тут отскок? Что ж, рано или поздно шар, конечно, остановится, и причина тому — затянувшийся отскок при его контакте с сукном бильярдного стола. Шар испытывает воздействие фактора, который называется трением качения, когда по мере продвижения шара и его поверхность, и сукно непрерывно проминаются и вновь расправляются. При абсолютно упругих поверхностях такой продолжительный отскок не играет роли и шар может катиться сколь угодно долго. Но если поверхности не абсолютно упругие и энергия во время качения расходуется впустую, шар остановится. Трение качения возникает из-за того, что сукно мягче шара и не очень упругое. По голому, не покрытому сукном сланцу, твердому и упругому, шар катился бы гораздо дольше и дальше.

Трение качения играет важную роль во многих играх с мячом, а для относительно неупругих мячей, шаров и полей оно становится еще более значимым. Например, высокая трава мягкая и почти не упругая, поэтому футбольный мяч далеко не укатится. Слабо накачанные мячи и шины тоже не отличаются упругостью и плохо катятся даже по твердому покрытию (см. 3). И хотя бег вроде бы мало чем напоминает качение, там тоже работает трение качения особого типа. Ваши ноги при каждом шаге сталкиваются с землей, и две соударяющиеся поверхности прогибаются и распрямляются на манер отскока. Если они очень упруги — скажем, вы бежите в хороших кроссовках по дорожке с современным синтетическим покрытием, — при каждом отскоке энергии расходуется мало и бежать приятно. Если же вы бежите по мягкой, неупругой поверхности, например по песку или земле, то каждый шаг отнимает у вас массу энергии и пробежка сильно изматывает.

3 Слабо накачанные шины мягче и не такие упругие, чем, те, что накачаны в соответствии с нормой, поэтому на первых сильнее сказывается трение качения. Один из самых простых способов оптимизировать расход топлива — это накачать шины до максимума рекомендованного давления. В основе явления трения качения лежит процесс продавливания и распрямления поверхностей, который приводит к стиранию крошечных участков резины при контакте с асфальтом и к их износу. Мягкие, сдутые шины изнашиваются больше тех, что накачаны правильно.

**Рис. 3.2.11.** (а) При ударе об абсолютно упругий борт направление перпендикулярной борту составляющей скорости шара меняется на противоположное, и шар “отражается” от борта зеркально. (б) Но в действительности борт не бывает абсолютно упругим, поэтому после отскока перпендикулярная составляющая скорости шара становится меньше. Реальное направление отскока шара отстоит от перпендикуляра дальше симметричного направлению соударения. Влияние вращения здесь не учитывается.





### 3.3 Карусели и американские горки

Загорелся зеленый сигнал светофора, ваш автомобиль рванулся с места, и вас тут же что-то вжало в сиденье. Словно земное тяготение каким-то образом одновременно потянуло вас не только вниз, но и назад. Однако назад вас толкает не тяготение — это ваша собственная инерция не позволяет вам тронуться с места вместе с машиной с таким же, как у нее, ускорением.

В такой ситуации мы испытываем перегрузку. Это чувство возникает у нас неоднократно в течение дня — например, когда наш автомобиль поворачивает или когда мы поднимаемся в скоростном лифте. Но сильнее всего перегрузка проявляется на аттракционах в парке развлечений. Мы движемся с ускорением то вверх, то вниз, крутимся на каруселях, мчимся вперед и назад на машинках аттракциона «Автодром», нас бросает то вправо, то влево во вращающихся подвесных кабинках. А больше всего у нас захватывает дух, безусловно, на американских горках: катание на них — одна сплошная жуткая перегрузка. Прикрыв на секунду глаза на прямом участке автостреды, вы едва ли разберете, едет машина или стоит. Но если вы закроете глаза на американских горках, вы все равно не пропустите ни одного, пусть даже самого незначительного, поворота рельсов. Потому что сейчас вы чувствуете не скорость, а ускорение. И правильнее было бы называть морскую болезнь не «болезнью скорости», а «болезнью ускорения».



**Рис. 3.3.1.** Когда автомобиль трогается с места с ускорением, вам кажется, что на вас действует сила тяготения и что вы движетесь с ускорением, направленным в противоположную сторону. На самом деле вы просто ощущаете массу собственного тела, которое сопротивляется ускорению.

#### Воздействие ускорения

Наиважнейшее соотношение в законах механики — это связь силы и ускорения. До сего момента мы рассматривали силы, отмечая, что они могут вызывать ускорение; в этом разделе мы поменяем угол зрения — рассмотрим ускорение и отметим, что оно вызывается силой. Для того чтобы вы приобрели ускорение, что-то должно вас подтолкнуть или потянуть. Ваши ощущения, связанные с ускорением, зависят от точки и способа приложения силы.

Ощущение, что вас прижимает назад, когда машина трогается, вызвано вашей инерцией, нежеланием вашего тела начать движение с ускорением (**рис. 3.3.1**). Машина и сиденье устремляются с ускорением вперед, а поскольку сиденье не дает вам пройти насквозь через его поверхность, оно прилагает к вам направленную вперед силу реакции опоры, которая сообщает вам направленное вперед ускорение. Но сиденье не может одновременно воздействовать на весь ваш организм. Оно давит вам в спину, и это давление передается дальше на кости скелета, мягкие ткани и внутренние органы вашего тела, сообщая им направленное вле-

ред ускорение. Каждый фрагмент вашего организма передает направленную вперед силу, необходимую для движения с ускорением, пока она не дойдет до передней поверхности вашего тела. Вся единая цепочка сил действует последовательно на все ваши органы и ткани, начиная со спины и до груди и живота, и сообщает вашему телу направленное вперед ускорение.

Сравним эту ситуацию с тем, что происходит, когда вы просто стоите на полу. Земное притяжение действует на вас с направленной вниз силой, которая распределяется равномерно по вашему телу, и каждая часть вашего организма имеет собственный вес; в сумме эти веса дают ваш полный вес. Пол, в свою очередь, действует на вас с направленной вверх силой реакции опоры, которая не дает вам с ускорением провалиться сквозь него. Но пол не может равномерно воздействовать на весь ваш организм. Он толкает вверх только ваши ступни, а уже они толкают скелет, мягкие ткани и внутренние органы, не давая им перемещаться вниз с ускорением. Каждый фрагмент костных или мягких тканей передает направленную вверх силу, необходимую для того, чтобы удерживать расположенные выше части тела от движения с направленным вниз ускорением. Вся единая цепочка сил действует последовательно на все части тела, от ступней до макушки, и препятствует перемещению вашего тела вниз с ускорением.

Как вы, наверно, заметили, два предыдущих абзаца очень похожи один на другой. Точно так же сходны ощущения, вызванные силой тяжести и ускорением. Земля не дает вам провалиться вниз, и вы кажетесь себе тяжелым; ваше тело ощущает действие всех внутренних сил, которые поддерживают все его части и не дают им перемещаться с ускорением, а вы воспринимаете эти ощущения как свой вес. Когда сиденье автомобиля посылает вас вперед с ускорением, вы тоже кажетесь себе тяжелым; ваше тело ощущает действие всех внутренних сил, которые посылают вперед с ускорением его части, а вы воспринимаете эти ощущения как свой вес. На этот раз вам кажется, что действие вашего веса направлено назад.

Как ни старайтесь, вы не сможете отличить ощущения, связанные с действием веса, от ощущений от ускорения, вызванного силой тяжести. И ускорение дурчит не только вас: даже самые изощренные лабораторные приборы не могут определить напрямую, испытывают ли они силу тяжести или ускорение. Но несмотря на то, что ваши ощущения вполне убедительны, направленная назад тяжесть у вас в животе возникает из-за инерции, а не какой-то направленной назад силы. Назовем это ощущение перегрузкой (см. ❶). Перегрузка всегда действует в направлении, противоположном ускорению, из-за которого она возникла, и его сила пропорциональна этому ускорению.

Если вы быстро набираете скорость, ощущение перегрузки, то есть чувство, будто вас тянет назад, может быть достаточно сильным. Однако вы не испытываете перегрузку в чистом виде; вы ощущаете также собственный вес — он тянет вас вниз, — и все это вместе создает впечатление огромного веса, действие которого направлено под углом между вертикалью и направлением против движения машины. Чем больше ускорение, тем сильнее перегрузка и тем выше кажущийся вес, действие которого направлено назад (рис. 3.3.2).

Однако действие перегрузки в автомобиле не всегда направлено назад. случается, что оно направлено вперед и даже вбок. Когда ваша машина поворачивает влево, ускорение направлено влево и вы испытываете значительную перегрузку вправо. Если же вы не за рулем и можете себе позволить прикрыть глаза, вам легче будет ощутить, как ускорение действует в самых разных направлениях.

## Карусели

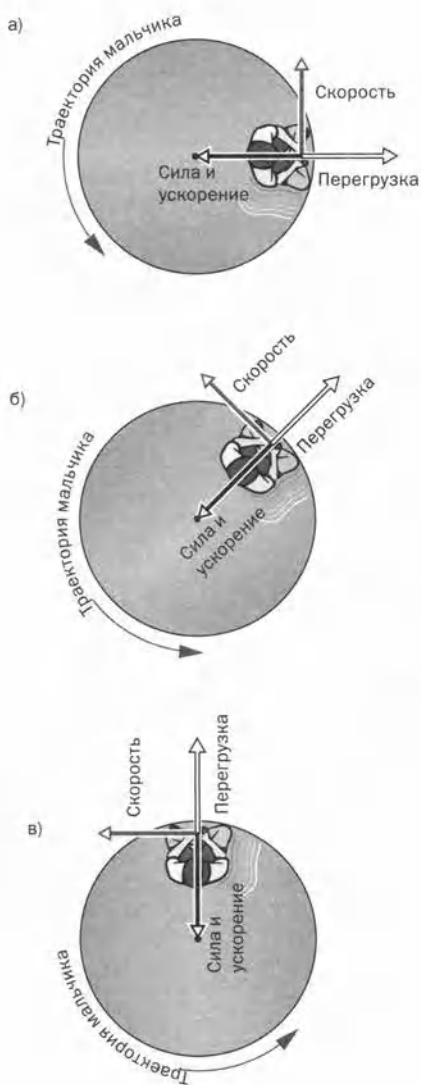
Катаясь на карусели, вы едете по кругу вокруг центральной оси аттракциона. Это совсем не то, что движение тела, которое просто движется вперед, демонстрируя инерцию. Если бы действующая на вас результирующая сила была равна нулю, то, согласно первому закону Ньютона, вы двигались бы по прямой с постоянной скоростью. Но поскольку вы перемещаетесь не по прямой, а по кругу, направление вашего движения меняется; результирующая сила отлична от нуля, и вы должны получить ускорение.

Каким образом вы его получаете? Примечательно, что ваше ускорение всегда направлено к центру круга. Чтобы понять, почему это так, давайте рассмотрим простейшую карусель, которая вращается с одной и той же скоростью против часовой

❶ Ощущение влияния ускорения — мы будем называть это чувство перегрузкой — иногда описывают как действие фиктивной, или кажущейся силы. Но на самом деле это не настоящая сила, и наш термин вносит некоторую ясность в путаницу понятий.



Рис. 3.3.2. (а) Если вы мягко трогаетесь с места, перегрузка придавливает вас к сиденью несильно, и вам кажется, что ваш вес направлен вниз. (б) При большом ускорении, направленном вперед, вы испытываете большую перегрузку, словно что-то отбрасывает вас назад, и вам кажется, что ваш вес направлен вниз и назад.



**Рис. 3.3.3.** Ускорение мальчика, катающегося на карусели, всегда направлено к центральной оси вращения. Вектор скорости указывает на движение мальчика по кругу, но вектор ускорения направлен к центру. В то время как мальчик едет на север (а), его ускорение направлено на запад. Вектор скорости постепенно меняет направление, пока мальчик не повернется к северо-западу (б), и в этот момент его ускорение направлено на юго-запад. Он едет дальше, поворачивает на запад (с), а вектор ускорения направлен к югу (север на этом рисунке находится вверх).

стрелки (**рис. 3.3.3**). В начальный момент мальчик на карусели находится точно на востоке и движется на север (**рис. 3.3.3, а**). Если бы его никакая сила на него не воздействовала, он так и ехал бы на север, пока не свалился бы с карусели. Однако он катится по кругу с ускорением, направленным к центру (то есть в данный момент на запад). В результате его вектор его скорости поворачивается на северо-запад, и мальчик перемещается в том же направлении. Чтобы не упасть с карусели, он должен постоянно двигаться с ускорением, направленным к центру, который теперь находится на юго-западе (**рис. 3.3.3, б**). Вектор скорости мальчика направлен на запад, и мальчик движется по кругу в ту же сторону. И так далее (**рис. 3.3.3, в**).

Тело мальчика хочет продолжать движение по прямой, но карусель тянет его к центру, так что ускорение мальчика направлено к оси вращения. Мальчик участвует в равномерном круговом движении. Равномерном — потому что мальчик всегда движется с одной и той же скоростью, хотя направление его перемещения меняется. Слово “круговой” описывает путь (траекторию) мальчика.

Ускорение тела мальчика (как и любого тела при равномерном круговом движении) всегда направлено к центру круга. Подобное ускорение называется центростремительным, и вызывает его направленная к центру круга центростремительная сила. Это не какая-то особая разновидность силы, способная проявляться сама собой, как сила тяжести, а результат совместного действия на тело всех остальных сил. Центростремительной она названа потому, что стремится к центру, толкает тело в центр круга. Чтобы к мальчику была приложена центростремительная сила, со стороны карусели действуют сила реакции опоры и сила трения, а мальчику сообщается центростремительное ускорение. Центростремительное ускорение широко используется в парках развлечений.

Модуль центростремительного ускорения мальчика зависит от скорости движения и радиуса карусели. Чем быстрее крутится мальчик и чем меньше радиус круговой траектории, тем выше ускорение. Это ускорение равно квадрату скорости, деленному на радиус круга.

Кроме того, ускорение мальчика можно выразить через угловую скорость и радиус карусели. Чем быстрее вращается карусель и чем больше радиус круговой траектории мальчика, тем выше ускорение. Ускорение равно квадрату угловой скорости карусели, умноженному на радиус круга. Эти два соотношения можно записать так:

$$\text{ускорение} = \frac{\text{скорость}^2}{\text{радиус}} = \text{угловая скорость}^2 \times \text{радиус} \quad (3.3.1).$$

Поскольку ускорение мальчика направлено внутрь, к центру круга, перегрузка вызывает у него ощущение, будто его отталкивает наружу, прочь от центра. Мальчику кажется, что его вес заставляет его двигаться вниз и за пределы круга, и он крепко держится за поручни, чтобы не упасть.

Иногда вес и перегрузка существенно отличаются по интенсивности восприятия. В то время как вес — это особая гравитационная сила, действие которой вы ощущаете вблизи поверхности Земли, действие перегрузки может ощущаться как направленное куда угодно, и это ощущение может быть сколь угодно сильным или слабым. При очень быстром движении по маленькому кругу вам запросто может показаться, что из-за перегрузки ваш вес сильно увеличился.

Перегрузку можно измерить относительно вашего веса. Если ускорение ощущается так же, как вес, будем считать, что перегрузка равна 1 g (обычно читается как “жэ”). Чтобы испытать перегрузку в 1 g, вам надо приобрести направленное в противоположную сторону ускорение 9,8 м/с, то есть ускорение свободного падения. Если ваше ускорение в 5 раз больше — скажем, на головокружительном аттракционе или в выполняющем крутой вираж самолете, — вы испытаете перегрузку 5 g.

## Ускорение на американских горках

На американских горках возникает много разных необычных эффектов — вам то и дело кажется, будто вы только что чудом избежали столкновения с препятствием или потеряли ориентацию, — однако по-настоящему щекочет нервы движение с ускорением. На многих аттракционах вам приходится порой двигаться на

боку или вверх тормашками, и вам кажется, что гравитация тянет вас то в одну сторону, то в другую. Но стоит ли за это платить, ведь постоять на голове можно и бесплатно? Чтобы получить поистине острые ощущения, требуется ускорение — именно оно дает вам чувство невесомости, возникающее в момент, когда поезд ныряет вниз с первого же пика, и колоссальной перегрузки на крутых виражах. Вы гораздо сильнее ощущаете изменение величины “гравитации”, нежели изменение направления ее действия. Теперь мы подошли к тому, чтобы изучить американские горки и разобраться в своих ощущениях на спусках и в мертвых петлях.

Каждый раз, как поезд набирает скорость, вы испытываете перегрузку, которая давит на вас в направлении, обратном ускорению. Из-за перегрузки у вас возникает ощущение увеличения собственного веса, он теперь явно отличается от вашего привычного веса. Как мы видели на примере автомобиля, при большом, направленном вперед ускорении ваш кажущийся вес давит на вас назад, в направлении задней части машины, а при резком торможении — вперед. Но на американских горках происходит то, чего не бывает в машине, — вагончики могут ехать вниз с очень большим ускорением! В этом случае перегрузка толкает вас вверх и противодействует направленному вниз весу, так что они частично компенсируют друг друга. В итоге ваш кажущийся вес становится меньше фактического, и если направленное вниз ускорение достаточно велико, действие веса может быть направлено не вниз, а вверх!

Рассмотрим последний вариант: при определенной величине направленного вниз ускорения противодействующая перегрузка и ваш направленный вниз вес полностью компенсируются. Вы оказываетесь в невесомости, как если бы земного притяжения не было. В случае такой полной компенсации направленное вниз ускорение равно ускорению свободно падающего тела. Ваш вес не изменился, просто на вас больше не действует сила реакции опоры со стороны вагончика, и вы катитесь вниз с ускорением  $9,8 \text{ м/с}^2$ . Вы чувствуете то же самое, что человек, который шагнул вниз с вышки для прыжков в воду.

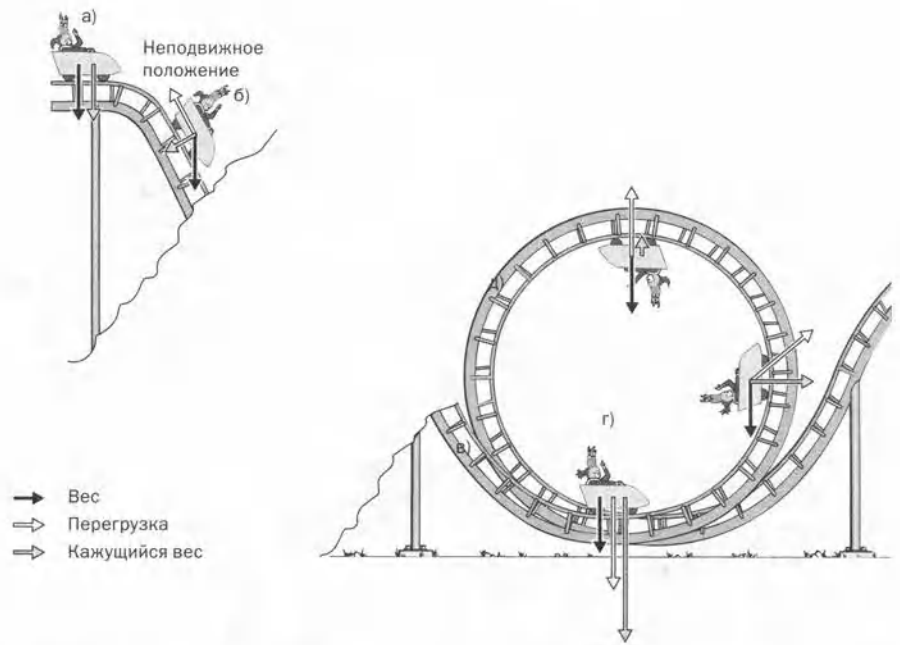
Поскольку на свободно падающие тела действует только сила тяжести, им не надо подталкивать друг друга, чтобы сохранить свое относительное расположение. Когда вы падаете, ваша шляпа и солнечные очки падают вместе с вами, им не требуются силы реакции опоры со стороны вашей головы. Даже если очки упадут, они будут парить перед вами, и вы вместе полетите вниз с ускорением. Вот и вашим внутренним органам не требуется поддержка соседних органов, и отсутствие внутренних сил реакции опоры вызывает ту самую эйфорию от ощущения свободного падения. Точно такое же ощущение возникает, когда вы развлекаетесь на аттракционе “свободное падение”: вы падаете секунду-другую и чувствуете себя абсолютно невесомым. Разумеется, прежде чем вы ударитесь об пол, ваше падение постепенно замедляют до полной остановки, поэтому ближе к подножию аттракциона вы испытываете воздействие направленного вверх ускорения и стремительно “тяжелее”. Подобная смена впечатлений происходит во время прыжка с высоты на эластичном канате: невесомость при свободном падении — и тяжесть, когда канат замедляет ваш полет.

Но на американских горках вагончики крепятся к рельсу, поэтому иногда катятся вниз с ускорением, превышающим ускорение свободного падения. В такой нестандартной ситуации рельс помогает земному притяжению, толкая вагончик вниз. Сидя в вагончике, вы почувствуете себя не просто лишенным веса. Направленная вверх перегрузка будет настолько велика, что ваш кажущийся вес будет направлен вверх, как будто весь мир вокруг вас опрокинулся! Когда ваш вагончик поедет вверх по вертикали, вы почувствуете, что вас отрывает от сиденья, — хорошо, что вы пристегнулись! А когда он перевернется вверх дном, вас придавит вверх к перевернутому сиденью.

## Мертвая петля на американских горках

На рис. 3.3.4 показан отдельный вагончик в разных точках нростой трассы с одним подъемом и одной мертвой петлей. Вес, перегрузка и кажущийся вес — величины векторные, как и скорость с ускорением. На рисунке им соответствуют стрелки разной длины, указывающие направление и величину векторов. Чем длиннее стрелка, тем больше модуль данной величины.

**Рис. 3.3.4.** Одноместный вагончик на американских горках преодолевает первый подъем и совершает мертвую петлю. В любой точке пути вагончик испытывает действие собственного веса, перегрузки, которая возникает из-за ускорения, и кажущегося веса, который является суммой этих двух величин. Кажущийся вес всегда направлен к рельсу и удерживает вагончик от падения.



2 В рамках программы исследований слабой гравитации агентство НАСА модифицировало два самолета-заправщика KC-135 *Stratotanker* таким образом, что они могли совершать полеты по параболической траектории свободно падающего тела. Примерно 25 секунд из каждых 65 секунд полета оба этих "чуда невесомости" испытывают действие нулевой результирующей аэродинамической силы и, таким образом, движутся только под действием собственного веса. Самолет, как и все, что находится внутри его округлого фюзеляжа, попросту падает, и его пассажиры находятся в полной невесомости — не зря эти самолеты прозвали "тошиловками"! Сейчас вместо KC-135 используются более современные воздушные суда, однако в остальном эксперимент мало изменился.

На вершине первой горы (**рис. 3.3.4, а**) вагончик практически неподвижен. Вы сидите в вагончике и ощущаете лишь собственный вес, направленный вниз, — пока ничего интересного. Но вот вагончик начинает спуск, едет вниз с ускорением, и вы испытываете перегрузку, направленную вверх вдоль рельса (**рис. 3.3.4, б**). Ваш истинный вес и чувство перегрузки в сумме дают кажущийся вес, который ощущается как очень небольшой и направленный вверх, вдоль рельса. Многих пугает неожиданное уменьшение кажущегося веса. Наши тела очень чувствительны к частичной потере веса, и это ощущение падения составляет половину удовольствия от катания на аттракционах. Астронавтов в космосе, в состоянии невесомости, это дискомфортное ощущение не покидает никогда. Неудивительно, что они часто страдают от морской болезни — недомогания, связанного с движением (или, скорее, с перегрузкой).

На поверхности Земли ощущение невесомости не может длиться долго. Оно возникает только при движении вниз с ускорением и исчезает, как только вагончик спускается к подножию горы (см. 2). К началу захода вверх на мертвую петлю вагончик катится с максимальной скоростью, и его ускорение направлено вверх (**рис. 3.3.4, в**). Это направленное вверх ускорение порождает перегрузку, действие которой направлено вниз, так что ваш кажущийся вес становится огромным и тоже направлен вниз. Вы испытываете перегрузку 2–3 g, и вас прижимает к сиденью.

Движение по мертвой петле схоже с равномерным круговым движением — это как бы один оборот на вертикальной карусели. Только когда вагончик на американских горках начинает подъем в петле, часть ее кинетической энергии переходит в потенциальную, и скорость падает. На спуске эта потенциальная энергия вновь превращается в кинетическую, и скорость вагончика возрастает. Из-за этих превращений энергии ваше ускорение направлено не строго в центр петли, а перегрузка не направлена прямо от центра. И все-таки в данном случае можно с достаточно точным приближением считать, что ускорение направлено к центру, а перегрузка — прочь от центра.

На полпути в мертвой петле ваше истинное ускорение направлено к центру и вниз, а перегрузка — наружу и вверх (**рис. 3.3.4, г**). Ваш кажущийся вес все еще намного больше реального и направлен вниз и наружу. Вас прижимает к сиденью, а вагончик — к рельсу (**рис. 3.3.5**).

Наконец вы взбираетесь на самый верх петли (**рис. 3.3.4, д**). В результате подъема против силы тяжести вагончик несколько замедляет ход. Но его ускорение по-прежнему направлено к центру круга, и вы испытываете действие направленной от центра перегрузки — на этот раз вверх. Ваш вес направлен вниз, но перегрузка превышает вес. Ваш кажущийся вес направлен вверх!

Мало того что перевернутый вагончик остается на рельсе — вы чувствуете, что какой-то не очень большой груз прижимает вас к сиденью. Это давит на вас

вагончик, который помогает силе тяжести перемещать вас с ускорением вокруг петли. Если на самом вершугу вы потеряете шляпу, она “упадет” на сиденье рядом с вами, хотя для этого ей явно надо двигаться вверх. В действительности ускорение вагончика, направленное точно вниз, больше ускорения шляпы, которая находится в свободном падении. Сила тяжести и рельс толкают вагончик вниз настолько быстро, что он обгоняет шляпу, — на самом деле ваша шляпа, конечно, падает, просто вагончик падает еще быстрее.

По правде говоря, обычная мертвая петля не представляет собой идеальную окружность — вверху она изгибается круче, чем по бокам и внизу. Форму кривой с переменным радиусом (такая кривая называется клотоида) выбирают ради безопасности и комфорта. На верхнем, особенно крутом участке траектории-клотоиды направленное вниз ускорение достигает максимума, а на всем остальном пути оно уменьшается. Сильное ускорение нужно только там, где вагончик переворачивается вверх колесами. На других участках, особенно в самом низу петли, где скорость вагончика максимальна и он быстро движется вверх, большое ускорение обеспечило бы пассажиру только чувство тяжести и дискомфорта.

Американские горки, как правило, сконструированы так, чтобы ускорение прижимало пассажиров к сиденьям даже в перевернутом вагончике. В принципе, при такой траектории пассажир не упадет, даже не будучи пристегнутым, хотя ремни безопасности гарантируют спокойствие и пассажирам, и страховщикам. Но иногда используются особые модели вагончиков и рассчитываются такие траектории, чтобы кажущийся вес пассажира был направлен от рельса. Такие вагончики могут переворачиваться в отсутствие достаточного направленного вниз ускорения, которое удерживало бы пассажира на сиденье, — и они в самом деле переворачиваются! Пассажиру такого вагончика правильно кажется, что он висит, и если он уронит шляпу, она упадет не в вагончик, а вниз, на землю.

А если катится не одиночный вагончик, а целый поезд? В основном работают все те же законы. Однако теперь к каждому вагончику приложена новая сила, действующая со стороны других вагончиков, и их влияние заметнее всего на вершине первой, самой высокой горы. Поезд отсоединяется от подъемной цепи, выезжает на спуск и катится медленно; передние вагончики переваливают через пик, еще не разогнавшись как следует (рис. 3.3.6, а). К тому же задние вагончики, еще не добравшиеся до вершины пика, тянут их обратно вниз, замедляя спуск. К тому моменту, как поезд наберет скорость, первые вагоны будут уже далеко внизу. На этом этапе поезд уже начинает подъем, и пассажиры первых вагончиков испытывают в основном действие направленного вверх ускорения и направленной вниз перегрузки. Поэтому в передних вагончиках невесомость ощущается не так сильно.

Напротив, задние вагоны уже в начале спуска едут с высокой скоростью. После того как передние перетаскивали их через первый пик, они развивают очень большое направленное вниз ускорение (3.3.6, б). В результате их пассажиры испытывают большую направленную вверх перегрузку и выраженное ощущение

- Вес
- ⇒ Перегрузка
- ⇐ Кажущийся вес

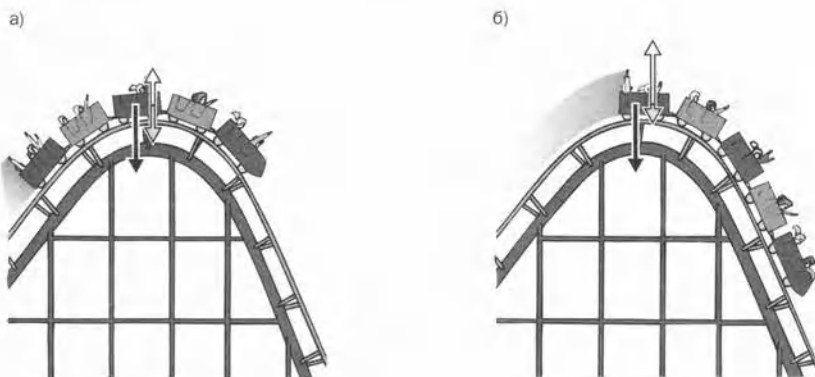


Рис. 3.3.5. Когда я раскручиваю над головой бокал с вином, его ускорение велико и направлено к центру круга. Поднос для пиццы, на котором стоит бокал, давит на него сверху вниз, поэтому бокал плотно прижат к подносу, а вино в бокале прижато к дну последнего. Возможно, у меня несколько нервный вид, но это не потому, что я боюсь, что вино выльется мне на голову, — я просто пытаюсь придумать, как бы мне остановить все это вращение, не разбив бокал.

Рис. 3.3.6. Во время спуска поезда с первой горки впечатления пассажиров передних и задних вагончиков различаются. (а) Первые вагончики преодолевают пик медленно и развивают высокую скорость уже далеко на спуске. Им не дают разогнаться задние вагончики. (б) Последние, в свою очередь, переваливают через вершину и сразу едут очень быстро. Направленное вниз ускорение задних вагончиков велико уже на самой вершине горки, и пассажиры испытывают сильное чувство невесомости.

❸ Плохо зафиксированные предметы в автомобиле, скорее всего, сдвинутся с места, когда машина начнет движение с ускорением: скажется их инерция, и они не успеют начать движение вместе с автомобилем. Например, при резком повороте налево монетки, забытые на приборной доске, соскользнут вправо, так как автомобиль теперь будет двигаться с ускорением влево и оставит их позади. И если вы, собираясь на пикник в складчину, второпях оставили на заднем сиденье противень с сочной запеканкой, берегитесь: если противень (вместе с остальным автомобилем) вдруг с ускорением уедет из-под запеканки, последствия могут быть крайне неприятными!

❹ Центрифуга в парке аттракционов представляет собой огромную камеру, которая раскручивается с достаточно большой скоростью, так что люди внутри нее оказываются плотно прижаты к стенкам. Затем пол камеры медленно опускается, однако посетители по-прежнему «прилипли» к стенкам, потому что их держит трение покоя.

❺ Американский физик Джесси Бимс (1898–1977), заинтересовавшись значительными фиктивными силами, которые развиваются в скоростных центрифугах, изобрел ряд замечательных ротационных устройств. В частности, он придумал ультрацентрифугу для биологических исследований и газовую центрифугу, которая применяется для разделения изотопов урана (это необходимо для выработки атомной энергии). В ходе своих экспериментов Бимс создал также крошечный диск, способный раскрутиться до миллиона оборотов в секунду и развить фиктивную нагрузку почти в миллиард г.

невесомости. Но конструкторы аттракциона, конечно, позаботились о том, чтобы это направленное вниз ускорение не оказалось чересчур велико, иначе пассажиры последнего вагончика могли бы, как из катапульты, вылететь со своих сидений.

Очевидно, не все равно, какие места занять в поезде на американских горках. На переднем сиденье прекрасный обзор, но эффект невесомости проявляется гораздо слабее. Сильнее всего невесомость ощущается в заднем вагоне, а самое скучное катание будет, пожалуй, во втором — и невесомость почти не ощутима, и любоваться затылками тех, кто сидит перед вами, быстро надоест.

## Центрифуга и центробежная сушка

Карусель являет собой разновидность центрифуги — устройства, которое раскручивает тела по кругу и подвергает их воздействию большого центростремительного ускорения. Другой бытовой пример центрифуги — стиральная машина с функцией центробежного отжима. Во время слива воды барабан разгоняется, и белье в барабане участвует в равномерном круговом движении. Оно перемещается по круговой траектории радиусом примерно 0,25 м со скоростью около 20 м/с. Согласно уравнению 3.3.1, ускорение белья равно  $(20 \text{ м/с}^2) / 0,25 \text{ м}$ , или  $1600 \text{ м/с}^2$ . Поскольку ускорение свободного падения равно  $9,8 \text{ м/с}^2$ , то ваше мокрое белье испытывает перегрузку примерно 163 g. Если масса белья составляет 5 кг, то его истинный вес равен 49 Н, но кажущийся вес во вращающемся барабане будет примерно в 163 раза больше, то есть почти 8000 Н.

Если бы проявилась инерция, вещи в машине двигались бы по прямой. Однако барабан развивает центростремительную силу 8000 Н, действующую на вещи внутри него, и белье отвечает движением по кругу с ускорением. Однако вода, будучи жидкостью, способна просочиться сквозь ткань в дырочки барабана и вылиться из центрифуги. В зависимости от конкретных обстоятельств, вода в той или иной степени демонстрирует инерцию и вместо того, чтобы вращаться по кругу с ускорением, движется прямолинейно. Вода покидает центрифугу с той скоростью, которая у нее была, когда барабан перестал оказывать на нее воздействие, — она движется по касательной к поверхности барабана (и стекает вниз). Важно уточнить, что вода покидает центрифугу не вдоль радиуса (от центра к краю барабана) — потому что и до этого ее скорость не была направлена радиально!

Вода не крутится с ускорением вместе с бельем в машине, а выливается из нее, именно поэтому белье отжимается. Этот эффект можно наблюдать, если сесть на пассажирское сиденье автомобиля, поставить себе на колени неглубокую миску с водой, а потом попросить водителя резко взять с места. Автомобиль действует на миску, сообщая ей направленное вперед ускорение, но вода не будет двигаться с ускорением вместе с миской. Едва только машина начнет набирать скорость, вода проявит свою инерцию (см. ❸) и останется на месте — то есть выльется вам на колени! Теперь вы хорошо понимаете, как работает центрифуга.

Помимо каруселей и стиральных машин, центрифуги используются в водяных насосах, научных и медицинских приборах, в аттракционах (см. ❹) и даже в производстве вина. В стиральной машине и на винодельне центрифуги извлекают жидкости из твердых веществ, в научной лаборатории и в больнице отделяют тяжелые фазы от легких. В научных лабораториях для разделения биологических материалов используются центрифуги, которые развивают перегрузку до  $100\,000 \text{ g}$  (см. ❹). В медицинских учреждениях центрифуги менее мощные — с их помощью разделяются компоненты крови для выявления различных аномалий.



## ГЛАВА 4

# ЕЩЕ О МЕХАНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ

---

**П**риродный механизм нашей Солнечной системы открыт каждому, кто наблюдает за небом, однако создатели рукотворных механизмов часто скрывают их от наших глаз. Так было не всегда: в эпоху промышленной революции эстетика машин вызывала восхищение и трогала чувства людей, а изобретатели гордились своими творениями, стараясь сделать их одновременно и функциональными, и прекрасными. Однако за последние лет сто механика стала для нас делом настолько обыденным, что мы предпочитаем прятать механизмы, словно чудаковатого дядюшку, которого мы стесняемся показывать гостям (хотя и пользуемся его деньгами).

Мы стали убирать механизмы с глаз долой примерно тогда же, когда начали воспринимать науку не как источник подлинной истины и знания, а исключительно как двигатель промышленности и торговли. В былые времена гуманитарные и естественнонаучные вопросы имели для людей одинаково важное значение и нередко занимали их одновременно — вспомним ученого и художника Леонардо да Винчи, философа и ученого Рене Декарта, государственного деятеля и ученого Бенджамипа Франклина. Но сегодня мы разделяем эти занятия. Ценности человечества не изменились — просто ученые стали больше думать о коммерческой стороне дела; в наши дни мы «делаем инвестиции» в науку. Отчего же мы больше не ищем в науке чистой красоты?

Но раз уж вы читаете эту книгу, то вам, по-видимому, понятно, что науке присуща красота, и я лишь повторяю то, что вам и так ясно. Надеюсь, вас, как и меня, радует когда скрытые прежде механизмы вдруг выходят на свет — в последнее время это стаповится модным. Сегодня уже никого не удивишь стеклянным лифтом или эскалатором, не говоря уже о прозрачных часах. Я вижу здесь обнадеживающий признак того, что не все ученые и инженеры занимаются сегодня наукой лишь ради красивого квартального отчета.

Окружающие нас машины и механизмы, независимо от их сложности, работают, как правило, на основе простых законов, которые мы уже изучили. В этой главе мы рассмотрим некоторые замечательные механизмы и попытаемся понять, что заставляет их работать. По мере продвижения к передовым рубежам науки и космонавтики мы вновь повторим уже знакомый нам материал и узнаем кое-что новое.

- 106 **4.1 Велосипеды**  
*Почему стоящий велосипед падает, а едущий — нет.*
  
- 114 **4.2 Ракеты и космические полеты**  
*Почему ракета летит вперед, отбрасывая свое топливо назад.*
  
- 127 **4.3 Земля, Луна и Солнце**  
*Как гравитация и законы механики управляют Солнечной системой и календарем.*
  
- 135 **4.4 Лифты**  
*Как с помощью несложных устройств и выигрыша в силе лифт поднимает и опускает пассажиров и тяжести.*



## 4.1 Велосипеды

Велосипед — прекрасное, экологически чистое транспортное средство, которое приводится в движение мускульной силой человека. Колеса позволяют велосипедисту свободно катиться по инерции, если дорога ровная, и без малейшего труда набрать скорость на спуске. Сравните приятную езду на велосипеде с пешей прогулкой, когда каждый шаг стоит вам усилий. Велосипед — очень простая машина, мы сразу видим большинство ее узлов и деталей — педали, зубчатую передачу, тормоза, руль и другие. Благодаря простоте конструкции, которую хорошо можно рассмотреть во всех сторонах, даже новичок сравнительно легко разберется в устройстве велосипеда.

### Трехколесный велосипед и статическая устойчивость

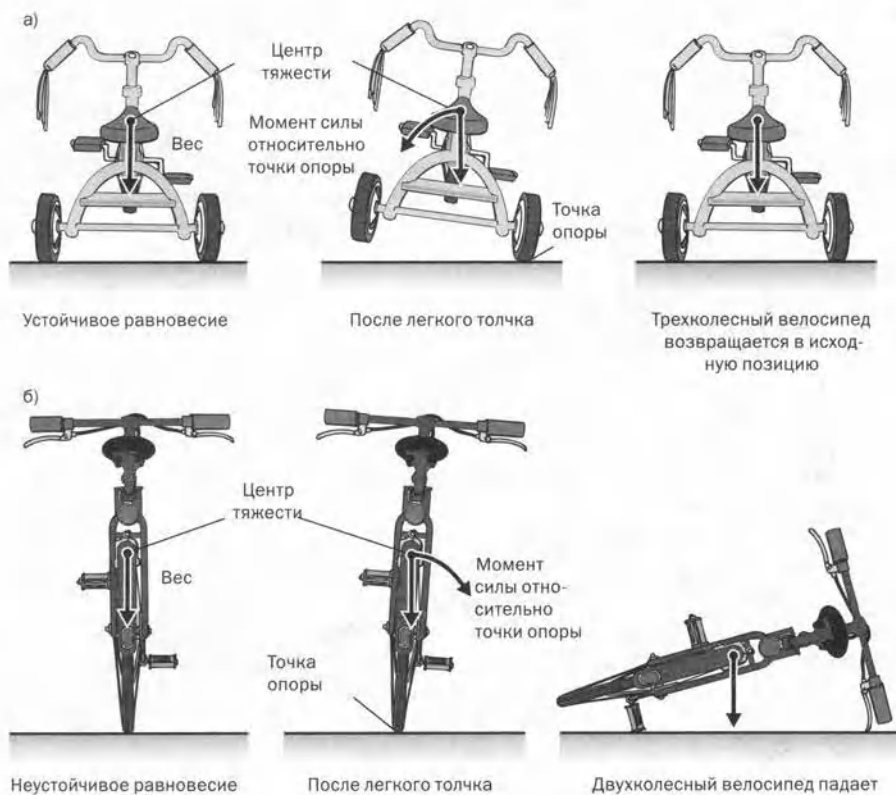
Двухколесный велосипед не может стоять на месте: ведь он опирается всего лишь на два колеса и в состоянии покоя падает. Тогда зачем же мы ездим на двухколесных велосипедах?

Чтобы ответить на этот вопрос, сначала надо понять, что такое статическая устойчивость, то есть способность тела сохранять устойчивость в состоянии покоя. Чтобы тело было статически устойчивым, оно должно находиться в состоянии устойчивого равновесия. Равновесие обязательно подразумевает нулевую результирующую силу и нулевой результирующий момент сил, но вблизи состояния равновесия проявляется действие возвращающих факторов — сил и моментов сил, — которые подталкивают тело к положению равновесия. Под влиянием этих факторов статически устойчивое тело при небольшом отклонении от состояния равновесия возвращается в него. Подобная статическая устойчивость свойственна табуретке, но вот двухколесному велосипеду — определено нет. Если вам нужен велосипед, который обладает статической устойчивостью, выбирайте трехколесную машину (рис. 4.1.1).

Трехколесный велосипед статически устойчив благодаря действию возвращающих сил, которые возникают, как только вы попытаетесь его наклонить (рис. 4.1.2, а). На самом деле трехколесный велосипед обладает только вращательной статической устойчивостью — он восстанавливает определенную (а именно вертикальную) ориентацию под действием возвращающих моментов сил. В отличие от велосипеда, стеклянный шарик, брошенный в чашу, обладает линейной статической устойчивостью — его заставляют вернуться в определенное положение (на дно чаши) возвращающие силы. Хорошо, что трехколесный велосипед не обладает статической устойчивостью при поступательном движении, — вело-



Рис. 4.1.1. Когда трехколесный велосипед стоит, он чрезвычайно устойчив. Но во время поворота на высокой скорости он может легко опрокинуться, потому что ездок не может наклонить его в сторону поворота. Кроме того, чтобы ехать с приличной скоростью, приходится из всех сил крутить педали.



**Рис. 4.1.2.** (а) Трехколесный велосипед в состоянии устойчивого равновесия. Если он наклонится, его центр тяжести поднимется, а потенциальная энергия возрастет, и возвращающие силы вернут его в вертикальное положение. (б) Двухколесный велосипед в состоянии неустойчивого равновесия. Достаточно слегка наклонить его, чтобы он упал.

сипедист вовсе не хочет оставаться на одном и том же месте, ему нужно лишь сохранять вертикальное положение!

Но почему на трехколесный велосипед действует возвращающие моменты сил? Давайте для начала рассмотрим более общий случай. Когда я учился физике, я понял, как важно всегда стараться разглядеть общую картину, скрытую за частными деталями того или иного явления, а иногда я был просто вынужден искать эту картину.

Вспомним, что ускорение тела направлено так, чтобы его полная потенциальная энергия уменьшалась как можно быстрее. В нашем случае угловое ускорение трехколесного велосипеда направлено так, чтобы он совершал вращательное движение при наиболее быстром уменьшении потенциальной энергии. При небольшом крене центр тяжести велосипеда приподнимается и потенциальная энергия увеличивается, а если вернуть велосипед в вертикальное положение, она снизится. Таким образом, для трехколесного велосипеда вертикальное положение — это состояние устойчивого равновесия; если его не трогать, он не двинется с места, а если слегка наклонить, он приобретет угловое ускорение, которое вновь поставит его ровно. Понятно, почему дети любят трехколесные велосипеды!

Взаимосвязь статической устойчивости и полной потенциальной энергии универсальна. Нет смысла искать какие-то возвращающие факторы, тем более что они могут быть довольно сложными. Если положение тела таково, что при малейшем сдвиге его потенциальная энергия возрастает, значит, оно находится в состоянии устойчивого равновесия и стремится это состояние сохранить. Это полезное правило применимо не только к трехколесным велосипедам и случаю статической устойчивости при вращении, но и к статической устойчивости при поступательном движении и к любым телам — от каное до мостовых пролетов и металлических конструкций. Хотите обеспечить телу устойчивость в состоянии покоя? Сделайте так, чтобы при небольшом смещении его полная потенциальная энергия возрастала!

### Устойчивое равновесие и потенциальная энергия

Тело находится в состоянии устойчивого равновесия, если при небольшом смещении его полная потенциальная энергия увеличивается.

Из этого общего наблюдения вытекает элементарное эмпирическое правило поведения тела, покоящегося на плоскости подобно трехколесному велосипеду: тело

может сколь угодно долго оставаться в состоянии устойчивого равновесия вращения, пока его центр тяжести находится над площадью опоры — области, ограниченной линиями, которые соединяют между собой точки соприкосновения тела с плоскостью. Это правило геометрически обосновано: если центр тяжести тела расположен над площадью опоры, то после легкого бокового толчка центр тяжести поднимается вверх и потенциальная энергия в поле гравитации возрастает. Предположим, что другие виды потенциальной энергии несущественны. Тогда тело, испытавшее боковой толчок, приобретет угловое ускорение, которое возвратит его в положение равновесия вращения, и это равновесие будет устойчивым.

Пределы статической устойчивости при вращении тела также определяют геометрия: если центр тяжести сдвинется за границы изначальной площади опоры, тело может уменьшить свою потенциальную энергию опрокинувшись — что оно обычно и делает. Именно по этой причине нельзя слишком сильно наклоняться, когда едешь на трехколесном велосипеде, — это настоящий рецепт катастрофы! Треугольная площадь опоры велосипеда задана тремя колесами, поэтому он сохраняет статическую устойчивость лишь до тех пор, пока центр тяжести всей системы находился над этим треугольником.

Но двухколесный велосипед опирается лишь на два колеса и площади опоры вообще не имеет (рис. 4.1.2, а). Следовательно, он не обладает статической устойчивостью. Такой велосипед находится в состоянии равновесия вращения, если стоит идеально ровно, но это равновесие неустойчивое. Если наклонить велосипед, его центр тяжести окажется выше, чем был, и потенциальная энергия уменьшится. Угловое ускорение двухколесного велосипеда выводит его из состояния равновесия. Иными словами, равновесие поставленного вертикально двухколесного велосипеда неустойчиво; при малейшем крене возвращающие моменты сил не возникают, велосипед наклоняется все дальше и все быстрее, пока не упадет.

### Неустойчивое равновесие и потенциальная энергия

Тело находится в состоянии неустойчивого равновесия, если при небольшом смещении его полная потенциальная энергия уменьшается.

### Двухколесный велосипед и динамическая устойчивость

Для людей, которые плохо держат равновесие, большое значение имеет статическая устойчивость. Именно поэтому дети сначала учатся кататься на трехколесном велосипеде. Но когда трехколесный велосипед едет, статическая устойчивость не гарантирует безопасности. Если ребенок катится с крутой горки и на полпути вдруг резко вывернет руль, он почти наверняка полетит кувырком. В чем же дело?

На ходу трехколесный велосипед сохраняет вертикальное положение только в том случае, если велосипедист не создает большого ускорения — например, не поворачивает налево или направо на большой скорости. Чтобы выполнить такой маневр, девочка на рис. 4.1.3 должна повернуть переднее колесо так, чтобы сила трения, возникающая в точке касания колеса и асфальта, толкала велосипед налево (рис. 4.1.3). Сила трения сообщает колесу ускорение, направленное влево, тем самым меняя направление вектора скорости, и велосипед поворачивает. Естественно, девочка тоже должна повернуть, поэтому велосипед увлекает ее за собой. Если поворот плавный, требуется лишь легкий толчок, который ничем не грозит маленькой велосипедистке.

Но при резком повороте девочка не успевает до конца повернуться вслед за велосипедом. Ее тело по-прежнему движется по прямой, и велосипед выезжает из-под пассажира. Авария! Как вы видите, трехколесный велосипед обладает высокой статической и низкой динамической устойчивостью (устойчивостью движения).

Трехколесный велосипед падает из-за того, что не может справиться с чересчур большим моментом силы, обусловленным силой трения на крутом повороте. Поворачивающая велосипед горизонтальная сила трения приложена значительно ниже общего центра масс велосипеда и велосипедистки (рис. 4.1.3, б) и создает крутящий момент относительно этого центра масс. Если этот момент невелик, статическая устойчивость вращения велосипеда обеспечит противоположно направленный возвращающий крутящий момент, который воспрепятствует возникновению углового ускорения. А при резком повороте огромный момент силы



**Рис. 4.1.3.** (а) Пока велосипед едет прямо, он устойчив, потому что при любом наклоне его центр тяжести поднимается. (б) Но если резко свернуть влево, трение создаст большую силу, действующую на колесо и направленную влево, и велосипед приобретет направленное влево ускорение. Эта сила трения порождает момент силы относительно общего для девочки и велосипеда центра масс, который заставляет велосипед упасть.

трения будет больше возможного возвращающего крутящего момента, и велосипед опрокинется вместе с седоком. На повороте при высокой скорости велосипед динамически неустойчив.

Поскольку задача любого транспортного средства — добраться до пункта назначения, динамическая устойчивость гораздо важнее статической устойчивости вращения. А двухколесный велосипед, хотя и не обладает статической устойчивостью, чрезвычайно устойчив на ходу: его динамическая устойчивость во время езды настолько высока, что его не так-то легко опрокинуть боковым толчком, и на нем вполне можно катиться, не держась за руль. У мальчишек такой прием считается настоящим каскадерским трюком — просто они еще не поняли, насколько это легко с физической точки зрения.

Английский физик Дэвид Джонс обнаружил, что удивительная динамическая устойчивость двухколесного велосипеда объясняется его способностью самопроизвольно поворачивать в сторону крена (см. ❶). Скажем, если велосипед наклонится влево, его переднее колесо автоматически повернет влево, словно специально для того, чтобы выправить положение велосипеда. И если стоящий двухколесный велосипед, выведенный из состояния неустойчивого равновесия, падает, то движущийся велосипед естественным образом удерживается под центром масс всей системы и возвращается в состояние равновесия.

Автоматическое подруливание становится возможным благодаря одновременному действию двух факторов — вращения и потенциальной энергии. Первый из этих факторов связан только с работой колес, которые ведут себя подобно гироскопу: каждое вращающееся колесо имеет момент импульса и стремится всегда вращаться вокруг фиксированной оси с постоянной угловой скоростью. Поскольку момент импульса можно изменить лишь за счет момента силы, колесо естественным образом стремится сохранять вертикальное положение.

Но сам по себе момент импульса не удержит двухколесный велосипед от падения (как не удерживает и трехколесный). Однако момент импульса вынуждает двухколесный велосипед подруливать автоматически — это похоже на так называемую прецессию гироскопа: под действием момента силы, перпендикулярного моменту импульса гироскопа, ось его вращения поворачивается вокруг точки опоры. Если велосипед находится в вертикальном положении, на переднее колесо не действует перпендикулярный момент силы со стороны дороги. Но стоит велосипеду наклониться влево, и направленная вверх сила реакции опоры уже не проходит через его центр масс и создает перпендикулярный колесу момент силы. Он-то и заставляет колесо прецессировать: ось его вращения наклоняется влево и выправляет велосипед так, чтобы тот не упал!

Наряду с гироскопической прецессией в автоматическом подруливании участвует и другой фактор, связанный с потенциальной энергией. Форма и угол наклона передней вилки таковы, что при небольшом крене велосипеда переднее колесо поворачивает в сторону крена, благодаря чему центр тяжести опускается и потенциальная энергия снижается. Если велосипед наклонится влево, переднее колесо приобретает ускорение, направленное влево — в сторону наиболее быстрого уменьшения потенциальной энергии велосипеда. Велосипед сам собой подруливает в сторону крена и не падает. Благодаря такому “самоуправлению” велосипед без седока способен достаточно долго сохранять равновесие, если толкнуть его вперед или спустить с горки.

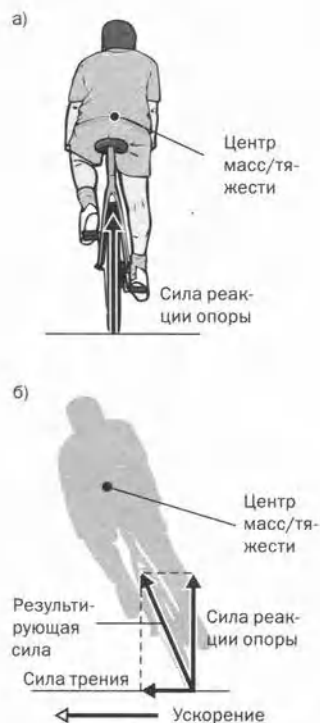
Конструкторы велосипедов мало что могут поделать с гироскопическим эффектом, а вот влияние потенциальной энергии зависит от формы и угла наклона вилки. Чтобы велосипед был устойчивым, его переднее колесо должно касаться земли позади оси поворота (рис. 4.1.4). Если вилка деформирована и точка касания находится перед осью поворота, то велосипед даже при небольшом наклоне будет поворачивать не так, как надо, и окажется практически непригоден для езды.

Передняя вилка взрослого двухколесного велосипеда, как правило, выгнута вперед, так чтобы колесо соприкасалось с землей сразу за осью поворота. Это обеспечивает велосипеду достаточную динамическую устойчивость во время движения плюс хорошую маневренность. Передняя вилка детского двухколесного велосипеда, напротив, обычно прямая, поэтому колесо касается земли за осью поворота на достаточном удалении от нее. Поэтому детский велосипед более устойчив в движении, но на нем труднее повернуть. Компромисс между устойчи-

❶ В 1970 году физик Дэвид Джонс исследовал закономерности динамического равновесия двухколесного велосипеда. Джонс сконструировал несколько “нефункциональных” моделей — в частности, велосипед с очень маленьким передним колесом, которое все время пробуксовывало и едва не раскалялось докрасна во время движения. Джонс выяснил, что одного только эффекта гироскопа для устойчивости велосипеда недостаточно. Оказалось, что устойчивость зависит от формы передней вилки.



Рис. 4.1.4. Двухколесный велосипед устойчив во время движения отчасти потому, что его переднее колесо соприкасается с землей позади оси поворота. Благодаря этому колесо естественным образом поворачивает в сторону крена едущего велосипеда и возвращает его в вертикальное положение.



**Рис. 4.1.5.** (а) На прямой дороге велосипед сохраняет равновесие вращения, если он ориентирован строго вертикально. Сила реакции опоры, действующая со стороны дороги, не создает момента относительно центра масс. (б) Поворачивая налево, велосипед останется в состоянии равновесия вращения, если наклонится влево. Сила реакции опоры и сила трения в совокупности создают нулевой результирующий момент силы относительно общего центра масс.

востью и маневренностью приходится искать всегда — не только для велосипедов, но и для автомобилей, яхт и самолетов. Чем выше устойчивость, тем труднее повернуть.

## Крен на повороте

Зачем же велосипедист на двухколесном велосипеде наклоняется на повороте? Дело в том, что при наклоне уравнивается момент силы трения, который действует на велосипедиста во время поворота, — тот самый момент силы, что сбросил нашу бедную девочку с трехколесного велосипеда. Наклонившись нужным образом, велосипедист преодолевает самый коварный поворот.

Велосипедист на ходу старается удержать себя и свою машину в состоянии равновесия вращения. Во время поворота на них обоих действует момент силы трения относительно их общего центра масс, и велосипедист компенсирует это воздействие, наклоняясь сам и/или наклоняя велосипед в сторону поворота. Со стороны дороги к колесам приложена направленная вверх сила реакции опоры, которая создает момент силы относительно центра масс системы велосипед/велосипедист, а этот новый момент силы противодействует моменту силы трения. Если сумма двух моментов сил равна нулю, велосипедист и велосипед благополучно сохраняют состояние равновесия вращения.

Раз оба противодействующих момента создаются силами, которые действуют со стороны дороги, их можно объединить: мы можем сложить силы трения и реакции опоры и посмотреть, какой момент результирующей силы будет действовать на велосипедиста. Оказывается, момент силы равен нулю при условии, что дорожное покрытие толкает колеса строго в направлении центра масс системы велосипед/велосипедист. Как мы видели в разделе 2.1, сила, направленная к точке вращения, создает нулевой момент силы относительно этой точки. Чтобы сохранять равновесие во время езды, велосипедист перемещает центр масс всей системы на линию вектора силы, приложенной к колесам со стороны дороги.

Например, если велосипед едет прямо, велосипедист может свести к нулю результирующий момент силы, удерживая машину в вертикальном положении. Сила со стороны дороги направлена ровно вверх, к центру масс системы (**рис. 4.1.5, а**). Но как только велосипед повернет налево, велосипедист должен наклониться и/или наклонить велосипед влево, чтобы сохранить равновесие вращения. Это связано с тем, что к каждому из колес приложена не только направленная вверх сила реакции опоры, но и направленная влево сила трения, которая сообщает ему ускорение на повороте (**рис. 4.1.5, б**). Таким образом, со стороны дороги действует результирующая сила, направленная вверх и влево. В нужной степени наклонившись вправо, велосипедист может добиться того, чтобы эта сила была направлена точно к центру масс и не создавала относительно него момента силы.

Когда вы учитесь кататься на велосипеде, вы быстро привыкаете, не задумываясь, наклонять машину на поворотах. Без этого вы просто-напросто не сможете управлять ни велосипедом, ни мотоциклом. Даже если ваш мотоцикл занесет на очень крутом вираже, вы сумеете, наклонившись, удержать его в состоянии равновесия вращения.

Но все наши рассуждения о крене на поворотах не дают ответа на вопрос: как именно вам удастся наклонить велосипед перед поворотом? На самом деле вы делаете это бессознательно, на какой-то краткий момент подруливая в “неправильную” сторону — в сторону, противоположную повороту! Велосипед начинает выезжать из-под вас, и вы оба наклоняетесь нужным образом. Затем вы поворачиваете руль в правильном направлении и в процессе поворота сохраняете равновесие вращения. Когда поворот закончен, вы еще раз на мгновение резко подруливаете, на этот раз в сторону поворота. Велосипед снова выезжает из-под вас, и вы с ним возвращаетесь в вертикальное положение. Поворот выполнен.

Наклониться может только велосипед, не обладающий статической устойчивостью, а в противном случае в состоянии равновесия вращения его могут удерживать лишь возвращающие моменты сил. Как мы видели на примере трехколесного велосипеда, такие моменты сил работают лишь до определенных пределов, и при большом ускорении велосипед выходит из состояния равновесия вращения. На очень крутом вираже могут опрокинуться и обычная легковая машина, и грузо-

вик, и высокий внедорожник, но с одними типами автомобилей такие аварии случаются чаще, чем с другими. Чем выше расположен центр масс автомобиля и чем уже площадь опоры, тем более ограничено действие возвращающих моментов сил и тем легче переворачивается машина. Особенно часто аварии такого рода случаются с внедорожниками, а небольшой “заряженный” спортивный пикап, на который установлена высокая кабина от тяжелого магистрального тягача, может быть просто смертельно опасен. Но даже некоторые модели самых обычных легковых автомобилей признаны небезопасными с этой точки зрения.

## Нажимая на педали

До сих пор мы говорили только об устойчивости. Но раз уж мы все согласились с тем, что велосипед — самый практичный вид транспорта из всех, что приводятся в движение мускульной силой человека, необходимо выяснить, как именно человек заставляет эту машину ехать. Можно было бы отталкиваться ногами от земли, но это крайне неудобно, а на больших скоростях даже опасно. Вместо этого мы с помощью педалей создаем крутящий момент, действующий на одно из двух колес. Как же создается этот момент?

Первоначальное решение состояло в том, чтобы прикрепить непосредственно к оси переднего колеса кривошип и с его помощью крутить колесо. Кривошип — это самый обыкновенный рычаг, соединенный одним концом с осью колеса. Когда вы перемещаете по кругу свободный конец рычага, он создает на этой оси крутящий момент. Если на конце кривошипа поставить педаль, вы сможете нажать на нее ногой. Надавив на педаль, вы приводите в движение переднее колесо, установленное на оси с помощью подшипника. Колесо начинает вращаться, и трение между вращающимся колесом и землей толкает велосипед вперед.

Конечно, даром ничего не дается — трение точно так же толкает колесо и назад, препятствуя его вращению. Поэтому вам приходится неустанно крутить педали; вы проворачиваете колесо вперед, в то время как трение старается повернуть его назад. Если оба момента сил уравновешены, вы едете с постоянной скоростью.

Именно таким образом устроены детские трехколесные велосипеды, однако этот способ движения имеет три недостатка. Во-первых, привод на переднее колесо усложняет управление велосипедом. Во-вторых, вы не можете позволить себе ни минуты отдыха — если вы хотите, чтобы велосипед ехал, вы должны непрерывно крутить педали. В-третьих, хотя вы и можете создать на переднем колесе более чем достаточный момент силы, работать ногами в таком темпе, чтобы они успевали за вращением педалей, довольно тяжело. На ровной дороге вы обнаружите, что вы изо всех сил крутите педали, почти не ощущая сопротивления.

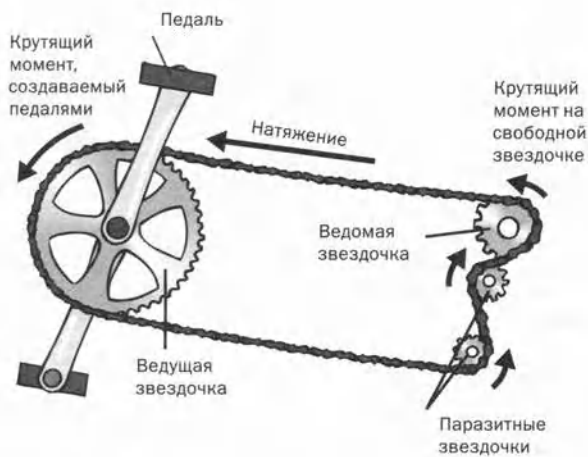
Безостановочно нажимать на педали — в этом вся суть любого педального транспорта, то есть такого, который тратит вашу энергию, энергию седока, на то, чтобы преодолеть инерцию, сопротивление воздуха и, возможно, горный склон. Вы обеспечиваете эту энергию, совершая работу над педалями — определенное количество работы в секунду. Поскольку работа равна произведению силы на расстояние, то вы можете совершать одну и ту же работу за каждую секунду (то есть обеспечивать машине постоянную мощность), когда будете нажимать на них и с большей силой (и при этом вращать их медленно), и с меньшей (но вращать их быстрее). Впрочем, по причинам скорее физиологическим, чем физическим, ваши ноги производят работу наиболее эффективно, когда вы нажимаете на педали с умеренным усилием и вращаете их с умеренной скоростью.

К сожалению, для того чтобы наиболее эффективно использовать вашу мускульную энергию, педали трехколесного велосипеда вращаются чересчур быстро и легко. Когда трехколесный велосипед быстро катится по ровной дороге, ваши ноги едва успевают за педалями — какая уж тут работа! Ваша способность передавать энергию трехколесному велосипеду не тратится зря только в одной ситуации — на подъеме при умеренной скорости; лишь в этом случае педали вращаются не слишком быстро и нуждаются в умеренном усилии с вашей стороны.

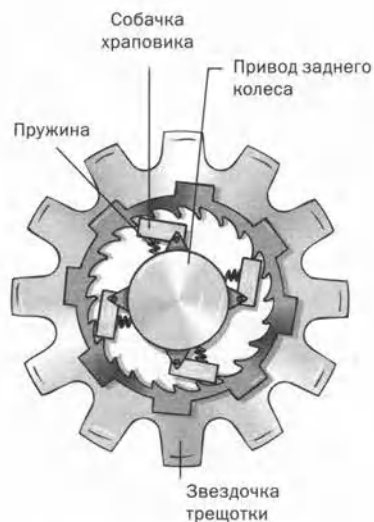
Поначалу эту проблему решали, увеличивая диаметр переднего колеса. Один оборот гигантского колеса перемещает вас на значительное расстояние, так что если вы достаточно быстро едете по ровной дороге, вам нет необходимости лихорадочно крутить педали. Вместе с тем трение о землю создает относительно



Рис. 4.1.6. Для того чтобы велосипедист мог ехать с разумной скоростью и при этом не слишком быстро крутить педали, велосипеды “пенни-фартинг” имели большое переднее колесо, непосредственно на оси которого были закреплены педали. Соотношение диаметров колес у этих велосипедов было примерно таким же, как и у английских монет пенни (более крупная) и фартинг.



**Рис. 4.1.7.** Система привода современного двухколесного велосипеда. Вращение педалей создает крутящий момент на ведущей звездочке, которая передает натяжение на верхний отрезок цепи. Тот, в свою очередь, создает крутящий момент на ведомой звездочке, а последняя передает его заднему колесу велосипеда (не показано). Паразитные звездочки поддерживают свободную часть цепи.



**Рис. 4.1.8.** Механизм свободного хода ведомого колеса двухколесного велосипеда. Если относительное вращение внутренней и внешней частей происходит в одном направлении, собачки храповика передают крутящий момент с внешней части на внутреннюю. Если направление относительного вращения меняется, собачки сжимают пружины и упираются в зубцы с внутренней стороны внешней части. Крутящий момент не передается.



**Рис. 4.1.9.** Современный двухколесный велосипед. Заднее колесо приводится в движение цепью, что дает велосипедисту возможность варьировать выигрыш в силе при передаче крутящего момента от педалей на заднее колесо. Трещотка втулки заднего колеса дает ему возможность свободно вращаться в одном направлении. Благодаря этому механизму велосипед может ехать по инерции при неподвижных педалях.

большой момент силы, который стремится повернуть огромное колесо назад, и чтобы сохранять постоянную скорость его вращения, вы должны сильнее жать на педали. Вы сможете достигнуть максимальной производительности при езде по ровной дороге, если будете нажимать на педали со средним усилием при средней скорости их вращения. Велосипеды такой системы — с колесами разного диаметра (**рис. 4.1.6**) — были изобретены в середине XIX века. Но у этих велосипедов, педали которых закреплены через кривошип непосредственно на оси поворачивающегося колеса, неважная управляемость, и вы все так же вынуждены непрерывно крутить педали, пока велосипед находится в движении. Более того, возникает новая трудность — на затыжном подъеме вам не удастся крутить их достаточно энергично для того, чтобы переднее колесо вращалось с постоянной скоростью.

От этих трудностей инженеры избавились, убрав кривошип с переднего колеса и придумав систему непрямого привода для передачи энергии на заднее колесо. Зубчатые звездочки и цепь (**рис. 4.1.7**) позволяют педалям и колесу велосипеда вращаться с разной скоростью. Теперь можно использовать выигрыш в силе и выбирать подходящий режим передачи энергии велосипеду — либо тратить больше сил при медленном вращении педалей, либо меньше при быстром их вращении, или, что лучше всего, прикладывать среднее усилие при средней скорости вращения педалей. Неважно, мчитесь вы вперед по ровной дороге или выкладываетесь по полной на крутом подъеме, всегда можно подобрать такой режим езды, чтобы эффективно использовать свою энергию и чувствовать себя комфортно.

И наконец, необходимость непрерывно крутить педали отпадает, если встроить во втулку заднего колеса трещотку (**рис. 4.1.8**). Трещотка позволяет заднему колесу свободно прокручиваться в одном направлении, так что можно катиться по инерции, не нажимая на педали. Современный двухколесный велосипед подобной системы показан на **рис. 4.1.9**.

## Велосипедные тормоза

Катиться с горки по инерции весело и приятно, но когда-нибудь надо и остановиться. Обычный велосипед имеет клещевые тормоза — резиновые колодки, которые трутся об обод колеса и замедляют его вращение (**рис. 4.1.10**). Чем сильнее вы нажимаете на тормоз, тем быстрее трение скольжения прекращает вращение колеса. Поскольку сила трения скольжения примерно пропорциональна силе дав-



ления резиновой колодки на обод колеса, вы можете регулировать снижение скорости, регулируя силу нажатия на тормоз.

Велосипеды более высокого класса оснащены дисковыми тормозами: жесткие металлические ажурные диски вращаются вместе с колесами, а в процессе торможения зажимаются фрикционными колодками (рис. 4.1.11). С точки зрения физики идея здесь та же, что и у обычного клещевого тормоза, но разнесение обода и трущихся частей тормозной системы позволяет оптимизировать и колесо, и тормоз: обод колеса с дисковым тормозом может иметь любое сечение, и даже самая вязкая глина, налипшая на обод, не повлияет на эффективность торможения.

Едва колеса начинают тормозить, со стороны дорожного покрытия на шины действует направленная назад сила трения покоя. Если затормозить чересчур резко, можно превысить предел силы трения покоя и колеса пойдут юзом. Трение скольжения по-прежнему будет замедлять ход теряющего управление велосипеда, а ваше тело, вероятно, будет тем временем продолжать двигаться по более или менее прямой траектории. Прямой путь к аварии!

Обычно оба колеса велосипеда снабжены независимыми тормозами, что отчасти связано с различиями в конструкции колес. Заднее колесо с большей вероятностью пойдет юзом при торможении, чем переднее. Силы, которые действуют на шины и вызывают торможение, создают моменты сил относительно центра масс велосипеда и стремятся оторвать заднее колесо от поверхности земли, так что его заносит. Однако тот же момент силы еще больше прижимает переднее колесо к земле, что увеличивает силу сцепления колеса с дорожным покрытием. Передний тормоз более эффективно снижает скорость велосипеда, чем задний, — но, конечно, не стоит тормозить так резко, чтобы вас перебросило через руль.

У детских велосипедов внешних (ручных) тормозов, как правило, не бывает. Единственный тормоз спрятан во втулке заднего колеса. Когда маленький велосипедист прокручивает педали назад, тормоз срабатывает и трение скольжения внутри ступицы замедляет вращение колеса. Поскольку торможение полностью обеспечивается задним тормозом, такой велосипед очень легко заносит. Иногда дети на полном ходу нарочно резко жмут на тормоз, чтобы заднее колесо пошло юзом и на тротуаре остался черный след от шины. Чтобы уменьшить риск заноса, на некоторых моделях велосипедов с задним тормозом дополнительно ставят передний клещевой тормоз.

Когда вы тормозите, вращающееся колесо совершает работу против силы трения скольжения в тормозных колодках. На что же расходуется энергия? Она переходит в тепловую энергию. Совершая работу против силы трения скольжения, вы неизбежно генерируете тепловую энергию. В велосипеде с дисковыми тормозами тепловая энергия выделяется в дисках и тормозных колодках, которые передают ее в обдувающий их встречный ветер. У велосипеда с клещевым тормозом тепловая энергия выделяется в металлическом ободе колеса, в резиновых тормозных колодках и в воздухе внутри шины — все это нагревается. На затяжном спуске вы рискуете перегреть тормозные колодки и колеса, поскольку тормоза переводят потенциальную энергию в тепловую. Кроме того, растет давление воздуха в шине, поскольку он нагревается в замкнутом пространстве, и перегретая шина может лопнуть. Для снижения скорости на длинном спуске лучше использовать не тормоза, а сопротивление воздуха. Тепловая энергия вырабатывается и в этом случае, но она нагревает воздух, который вокруг вас, а не тот, что наполняет шины.



Рис. 4.1.10. Когда вы приводите в действие этот клещевой тормоз, его резиновые колодки прижимаются к ободу колеса и создают трение скольжения. Возникающий момент силы трения заставляет колесо вращаться медленнее. Чем энергичнее вы жмете на тормоз, тем больше будет замедляющий движение момент силы. Тормозные колодки прижимаются к ободу рычагами, похожими на тот, что показан на рис. 2.1.15; металлический тросик тормоза подтягивает концы рычагов к ободу и перемещает их с маленьким усилием на большое расстояние, а рычаг прижимает колодку к ободу, перемещая ее на малое расстояние с большим усилием.



Рис. 4.1.11. Колодки дискового тормоза захватывают с обеих сторон металлический диск, который вращается вместе с колесом. В процессе торможения колодки прижимаются к диску и создают трение скольжения. Момент силы трения замедляет вращение колеса. Тормозные колодки размещаются в узле, показанном на рисунке справа; к диску их прижимают силы, возникающие, если потянуть тросик тормоза вверх. Отверстия на тормозном диске способствуют более быстрому рассеянию тепла и стеканию воды при торможении.



## 4.2 Ракеты и космические полеты

Несмотря на всю сложность конструкции современных космических кораблей, ракета — один из самых простых летательных аппаратов. В основе ее устройства лежит принцип, согласно которому всякое действие рождает противодействие. Ракета летит, выбрасывая определенное вещество из своей хвостовой части. Несмотря на всю эту простоту, ракеты разрабатывались и совершенствовались в течение более чем семисот лет. Ракеты используются в исследованиях космоса, в вооружениях, в спасательных операциях и развлечениях.

### Реактивный двигатель

Среди самых впечатляющих свойств ракеты — ее способность обеспечивать собственное движение даже в полной пустоте космического пространства, а также достигать за счет этой реактивной силы потрясающе высоких скоростей. Каким-то образом ракета толкает сама себя без помощи внешних сил, и создается впечатление, будто этот толчок может сообщить ей сколь угодно большое ускорение.

Разумеется, на самом деле ракета не может сама себя сдвинуть с места, так же как и вы не можете приподнять себя над землей за шнурки собственных ботинок, и ускорение ее имеет предел. В действительности ракета получает движущую реактивную силу, отталкиваясь от собственного топлива, а когда запас топлива иссякает, она перестает набирать скорость. Чтобы понять, как ракета извлекает реактивную силу из запаса топлива, давайте посмотрим, как работает третий закон Ньютона (тот самый, что описывает действие и противодействие) применительно к ракетам.

Представьте себе, что вы сидите на льду посреди замерзшего пруда и ваши скорость и импульс равны нулю. Солнышко пригревает, и влажный лед очень скользкий. Похоже, как ни старайся, вам не удастся сдвинуться с места. Как же вам добраться до берега?

❶ Шведский инженер Карл Густав де Лаваль (1845–1913), изобретатель сопла в форме песочных часов, на несколько десятилетий опередил развитие современных ракет. Лаваль сделал свое изобретение в поисках пути повышения эффективности паровых турбин, и его считают основоположником технологий производства турбин. Еще одно известное изобретение Лавалья — сепаратор, отделяющий сливки от молока.

Поскольку вы обладаете инерцией, то единственная надежда сдвинуться — это получить какой-нибудь толчок извне. Конечно, можно заказать по телефону пиццу, а когда ее доставят, оттолкнуться от разносчика. А можно вспомнить физические принципы, которые мы обсуждали на с. 68: снимайте кроссовку и бросайте ее изо всех сил в сторону восточного берега пруда (рис. 4.2.1). Бросая кроссовку, вы своей рукой прикладываете к ней силу. Кроссовка получает ускорение и летит надо льдом.

А что происходит с вами? Вы перемещаетесь к западному берегу! Вы двигаетесь, потому что, когда вы толкнули кроссовку в восточном направлении, она с такой же силой толкнула вас к западу. При этом вы передали импульс кроссовке — и она тоже передала вам импульс, но направленный в противоположную сторону. Импульс не может возникнуть из ниоткуда и исчезнуть в никуда, он может быть лишь перераспределен. Даже после того, как вы бросили кроссовку, ваш суммарный импульс равен нулю. Величина импульса кроссовки равна величине вашего противоположно направленного импульса.

Естественно, ваша масса намного больше массы кроссовки, поэтому вы двигаетесь гораздо медленнее, чем он. Импульс равен произведению массы на скорость, и чем больше масса тела, тем меньшая скорость ему нужна для получения такого же импульса. Так или иначе вы добились, чего хотели, — вы медленно скользите к западному берегу.

Ваша конечная скорость имеет предел, потому что вам удалось сообщить кроссовке лишь небольшой импульс, и вы также получили от нее небольшой импульс, направленный в другую сторону. Если бы вам удалось метнуть ее с более высокой скоростью или запустить в воздух целый ящик с обувью, ваш импульс был бы куда больше и вы начали бы скользить быстрее.

Однако швыряться кроссовками не слишком эффективно. Куда эффективнее было бы выпустить в сторону восточного берега быстрый поток газа. Даже при комнатной температуре скорость молекул в воздухе равна примерно 1800 км/ч. Если нагреть газ до 2800 °С — именно такова температура газа в жидкостном ракетном двигателе, — его молекулы будут двигаться втрое быстрее. Бросив что-либо с такой скоростью, вы получите изрядный по величине импульс, направленный в противоположную броску сторону.

Этот процесс и реализуется в классическом ракетном двигателе (рис. 4.2.2). В результате химической реакции топливо превращается в сильно разогретый газ реактивной струи. Энергия, которая сначала существовала в виде потенциальной энергии химического топлива, в разогретом и воспламенившемся газе превращается в тепловую (это главным образом кинетическая энергия хаотического движения крошечных молекул). Сопло ракетного двигателя направляет неупорядоченные перемещения молекул в одну сторону, и двигателю сообщается реактивная сила, направленная в противоположную сторону.

Если вам когда-нибудь доводилось наблюдать старт большой ракеты, вы, вероятно, заметили колоколообразные сопла, через которые выбрасываются газы (рис. 4.2.3). Каждое сопло направляет реактивную газовую струю назад и в результате позволяет ракете извлечь максимально возможный направленный вперед импульс и набрать максимально возможную скорость. Как мы увидим в главе 6, сопло позволяет газам преобразовать различные виды внутренней энергии в кинетическую энергию; сопло идеально подходит для того, чтобы направить поток и разогнать молекулы. Оптимальная форма сопла ракетного двигателя — это форма песочных часов. Такое сопло называется соплом Лавалья в честь его изобретателя — шведа Карла Густава де Лавалья (см. ❶).

Для более полного понимания того, почему для сопла ракетного двигателя требуется столь сложная форма, необходимо изучить физику газовых потоков, скорость которых близка к скорости звука или превышает ее. Позже мы поговорим об этом подробнее, а пока нам достаточно будет кратко коснуться данной темы.

Внутри ракеты, у входа в сопло Лавалья, горячий газ сильно сжат и находится под огромным давлением. Подобно газу из аэрозольного баллончика, раскаленный газ с ускорением вылетает из сопла в направлении области более низкого давления. Сужение сопла способствует росту ускорения до известного предела. Самую узкую часть сопла газ проходит со скоростью звука, и его свойства начинают кардинально меняться. Затем сопло расширяется, чтобы разогнать сверхзвуковую



**Рис. 4.2.1.** Импульс человека, который спокойно стоит на льду с кроссовкой в руках, равен нулю. Если он бросит кроссовку вправо, ее импульс будет направлен вправо, а импульс человека — влево. Суммарный импульс человека и кроссовки по-прежнему равен нулю. Но масса человека намного больше массы кроссовки, поэтому последняя движется намного быстрее.



**Рис. 4.2.2.** Молекулярная картина процесса в ракетном двигателе, который работает на химическом топливе. Топливо сгорает в камере двигателя, и из сопла выбрасывается реактивная газовая струя. Сопло превращает хаотическое тепловое движение молекул газа в упорядоченный поток, направленный от ракетного двигателя.



Рис. 4.2.3. Колоколовидные сопла Лавалья, которые использовались в космических челноках, сконструированы таким образом, чтобы газы реактивной струи выбрасывались вниз в виде длинных струй пламени, толкающих ракету вверх.

реактивную газовую струю еще сильнее. Здесь, в расширяющейся части колокола, исходный небольшой объем сильно сжатого газа увеличивается, и раскаленный газ уже подготовлен для того, чтобы выйти из сопла в окружающее пространство.

Оптимальный (то есть обеспечивающий максимальную реактивную силу) диаметр внешней половины сопла Лавалья зависит от внешних условий. На небольшой высоте над уровнем моря струя газа выходит в воздух, находящийся под нормальным атмосферным давлением, и в этом случае лучше всего подходит относительно узкое сопло. В стратосфере и в космосе газы выходят в разреженную среду или в вакуум, поэтому требуется более широкое сопло. Как правило, конструкторы находят некое компромиссное решение, чтобы сопло подходило и для тех, и для других условий.

К моменту выхода из сопла исходная энергия газа почти полностью переходит в кинетическую, а скорость газового потока направлена прочь от сопла. Однако поскольку газ продолжает гореть даже после выброса из сопла, его кинетическая энергия и скорость растут до фантастических величин. Благодаря конструкции сопла Лавалья скорость истечения реактивной газовой струи — то есть скорость направленного назад потока газов, выходящего из двигателя ракеты, — достигает значений от 10 000 до 16 000 км/ч.

Ракета выбрасывает реактивную струю назад и сообщает ей направленный назад импульс. Реактивная газовая струя посылает ракету вперед и тем самым замыкает процесс передачи импульса. Все, что требуется для получения реактивной движущей силы, — это собственно выброс газов; ракете не нужно отталкиваться от какого-либо другого тела, и она отлично летит даже в полной пустоте (см. ❷). “Оттолкнувшись” с достаточной силой от собственного выброса, ракета не только компенсирует собственный вес, но и поднимается с ускорением. В момент старта космический челнок вместе с топливным баком весит около 20 000 000 Н, а реактивная сила равна примерно 30 000 000 Н. Это означает, что шаттл может двигаться вверх с ускорением вдвое меньшим, чем ускорение свободного падения! По мере того как корабль сжигает свое топливо и его вес и масса уменьшаются, он устремляется ввысь все быстрее.

### Распространенное заблуждение: действие и противодействие в ракетах

**Заблуждение:** Чтобы начать движение, ракета должна оказать противодействие некоему постороннему телу.

**На самом деле:** Поскольку движение ракеты предполагает действие двух равных и противоположно направленных сил — действия и противодействия, ракета выталкивает назад реактивную газовую струю (действие), а реактивная струя толкает ракету (противодействие). Если струя газов и ударяется во что-либо после выхода из сопла, это не имеет отношения к реактивному движению ракеты.

❷ 13 января 1920 года газета *The New York Times* в редакционной статье на первой полосе раскритиковала предложение Роберта Годдарда использовать ракеты для космических путешествий. С умеренной финансовой помощью Смитсоновского института Годдард одним из первых занялся разработкой ракет на жидком топливе. Начинаясь статья следующим образом: “Утверждать, будто профессор Годдарда, занимающий кафедру в Университете Кларка и пользующийся поддержкой Смитсоновского института, не знает о взаимосвязи действия и противодействия и о том, что для противодействия необходима опора гораздо более существенная, чем вакуум, — так вот, утверждать такое было бы абсурдом. Разумеется, нам лишь почудилось, будто он не знает элементарных вещей из курса обычной средней школы”.

### Стабилизация ракеты

Пока ракета рассекает слои атмосферы, ей лучше всего лететь носом вперед. Даже птица, которая вдруг полетит хвостом вперед, будет выглядеть довольно глупо, но потерявшая стабилизацию ракета к тому же чрезвычайно опасна. Чтобы сохранить правильную ориентацию, ракета должна обладать динамической вращательной устойчивостью. Немало ракет было дистанционно уничтожено вскоре после запуска, поскольку они потеряли динамическую устойчивость и стали беспорядочно кувыркаться в воздухе.

Ракета динамически устойчива, если суммарный момент приложенных к ней сил относительно ее центра масс равен нулю при ее ориентации носом вперед. При любом отклонении от этого положения она должна возвращаться к нему. Любые моменты сил должны либо вновь и вновь разворачивать ракету носом вперед, либо они должны быть пренебрежимо малы.

Ракетный конструктор обязан принять во внимание две причины возникновения моментов сил. Во-первых, силу тяги двигателя. Расположенный в задней части ракеты двигатель толкает ракету вперед, и потенциально это может иметь неприятные последствия. В конце концов, даже обычную тележку легче направить в нужную сторону, если тянуть ее спереди, а не толкать сзади. Для того чтобы

ракета постоянно была ориентирована носом вперед, двигатель должен создавать силу тяги, направленную точно к центру масс, — тогда на ракету не действует момент силы. Если один из двигателей не совсем точно ориентирован, его тяга может создать момент силы, который начнет закручивать взлетающую ракету. Моменты сил, возникающие из-за смещения двигателя, — одна из самых распространенных причин крушения современных ракет. Сбой в работе самого двигателя или его системы управления может привести к тому, что ракета выйдет из-под контроля.

Во-вторых, на ракету, пока она находится в атмосфере, могут действовать моменты аэродинамических сил. Аэродинамику мы будем изучать в 6-й главе, а пока достаточно сказать, что обтекающий ракету воздушный поток помогает ракете лететь носом вперед при условии, что сопротивление воздуха у ее хвостовой части больше, чем спереди. В этом случае аэродинамические силы приложены к хвосту ракеты позади центра масс и направляют ее носом вперед.

Устойчивость простейшей ракеты обеспечивается исключительно аэродинамикой. Хвостовое оперение ракеты способствует формированию аэродинамических сил, которые удерживают ее хвост сзади. Сопла двигателей тоже тщательно выровнены так, чтобы реактивная газовая струя не создавала момента силы относительно центра масс ракеты. Такая ракета летит по прямой, но ею трудно управлять.

У современных высокотехнологичных ракет хвостового оперения нет, они стабилизируются за счет реактивных сил. Такие ракеты умеют контролировать собственную ориентацию и поворачивать сопла двигателей таким образом, чтобы скорректировать траекторию. Кроме того, на корпусе таких ракет имеются дополнительные небольшие рулевые двигатели, которые создают моменты сил и поддерживают правильную ориентацию ракеты. Большинство современных ракет-носителей вообще не имеют стабилизаторов. Их устойчивость и маневренность полностью обеспечивают находящиеся под постоянным контролем двигатели.

То, что коррекция траектории полета осуществляется исключительно с помощью реактивной газовой струи, становится принципиально важным, когда космический аппарат покидает атмосферу Земли. В безвоздушном пространстве, где не возникают моменты аэродинамических сил, полет корабля направляется лишь специальными рулевыми двигателями, которые короткими выбросами реактивных газовых струй поворачивают корабль в нужном направлении. Крылья и хвостовое оперение нужны космическому челноку лишь при возвращении на Землю, когда он начинает планировать в атмосфере. На орбите ни крылья, ни хвост не работают, потому что там нет воздуха, от которого они могли бы оттолкнуться.

Однако любой уважающий себя командир космического экипажа хочет, чтобы его корабль выглядел как можно более элегантно — уж не хуже, чем звездолеты, которые нам показывают в блокбастерах. Космические летательные аппараты в кино почти всегда украшены совершенно бесполезными в космическом пространстве хвостовым оперением и крыльями. И когда вы в очередной раз увидите на экране межгалактический крейсер с элегантными крыльями и хвостом, не забывайте, что ничуть не менее эффективным будет звездолет, похожий, скажем, на гигантский и неуклюжий школьный автобус.

## Конечная скорость космического корабля

Несколько упрощая, можно сказать, что ракета на стартовой площадке состоит из собственно летательного аппарата и топливного бака. Как только запускается двигатель, струя газов, образуемая в результате сгорания топлива, вырывается с ускорением назад, а ракета получает ускорение, направленное вперед. Топливо продолжает гореть, пока полностью не выгорит, и дальше космическому кораблю придется лететь по инерции. Хотя вес ракеты и сопротивление воздуха также оказывают влияние на полет, мы не будем учитывать эти два фактора и посмотрим, чем определяется конечная скорость аппарата.

Казалось бы, эта скорость должна быть ограничена скоростью выходящей из сопел газовой струи. Однако на самом деле это не предел для скорости ракеты. Пока выброс газов продолжается, ракета набирает скорость. Но чтобы достичь по-настоящему высокой скорости, ракете придется вытолкнуть назад в виде реактивных газов подавляющую долю своей стартовой массы. Скажем, если масса

В 1989 году правительство США развернуло программу создания ракеты-носителя многоразового использования, которая должна была выходить на околоземную орбиту, используя лишь одну ступень. Предполагалось, что при запуске расходовался бы только запас топлива, так что ракета могла бы многократно запускаться с Земли на орбиту и снова приземляться и в перерывах между полетами ей требовалась бы лишь заправка и минимальное техническое обслуживание. Однако разработчики проекта столкнулись с колоссальными трудностями. Даже при условии, что в качестве топлива будут использоваться жидкие водород и кислород, его масса должна составить почти 90% стартовой массы аппарата. Тем не менее попытки построить одноступенчатую многоразовую ракету-носитель продолжаются.

\* В России эта формула известна как формула Циолковского, хотя она была впервые выведена задолго до К. Э. Циолковского (1857–1935).

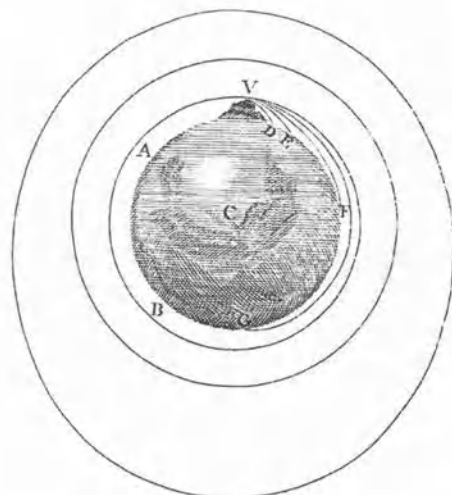


Рис. 4.2.4. Рисунок Ньютона: пушечное ядро, выпущенное горизонтально с вершины высокой горы (V) с разными скоростями. При самой малой скорости ядро падает на землю у подножия горы (D). Однако при увеличении скорости ядро пролетает большее расстояние от горы, прежде чем упадет на землю (P). Если скорость еще выше, кривая земной поверхности “убегает” из-под ядра, и до падения оно успевает пройти какой-то путь вокруг Земли (F). При самой высокой скорости ядро вовсе не касается земной поверхности (B). Оно начинает облетать Землю по кругу (A). Две внешние петли, круг и эллипс, обозначают орбиты, на которые можно было бы выйти при запуске с вершин более высоких гор.

топлива составляет 90% стартовой массы ракеты-носителя (то есть на старте мы имеем 9 частей топлива на 1 часть полезной нагрузки), то можно было бы ожидать, что в конце концов ракета разгонится до скорости, в 9 раз превышающей скорость реактивной струи — именно это соотношение удовлетворяет закону сохранения импульса.

К сожалению, при подобном способе расчета мы переоцениваем скорость ракеты-носителя: поскольку в баках продолжающей устремляться ввысь ракеты еще остается немало топлива, некоторая часть импульса, который сообщает ей реактивная газовая струя, расходуется не на саму ракету и ее полезную нагрузку, а на это, еще не истраченное топливо. Однако в следующий момент это топливо тоже стремительно покинет ракету в виде горящих газов, и драгоценный импульс будет растрачен зря — а ракете и космическому кораблю, который она поднимает на орбиту, сообщится импульс меньшей величины. И хотя суммарный импульс ракеты, космического корабля и груза топлива по-прежнему равен нулю, столь нерациональная передача импульса от реактивной струи к топливу приводит к снижению как направленной вперед скорости ракеты, так и направленной назад средней скорости реактивного выброса.

И все же космическая ракета способна лететь быстрее реактивной струи — просто ей потребуется больше топлива. Если пренебречь сопротивлением воздуха и весом, конечная скорость корабля задается следующей формулой\*:

$$\text{скорость летательного аппарата} = \text{скорость реактивной струи} \times \ln \left( \frac{\text{масса ракеты} + \text{масса топлива}}{\text{масса ракеты}} \right) \quad (4.2.1).$$

Если при запуске ракеты-носителя 90% массы приходится на топливо, то ее скорость может превысить скорость реактивной газовой струи в 2,3 раза. А если удастся сбросить в виде реактивных газов больше 90% стартовой массы, то ракета полетит еще быстрее.

Однако сжечь огромную долю стартовой массы ракеты и сбросить ее в виде раскаленного газа довольно сложно. Не так-то просто построить летательный аппарат, масса которого на 99,99% состояла бы из топлива и лишь на 0,01% из полезных конструкций. Поэтому космические ракеты-носители имеют несколько ступеней, причем каждая последующая ступень существенно меньше предыдущей. Как только израсходован весь запас топлива первой ступени, сбрасывается и сама ступень, и начинает работать следующая. Затем процесс повторяется. При такой схеме получается, что ракета сбрасывает вместе с газовой струей почти всю свою массу. Если запас топлива достаточно велик, то многоступенчатая ракета-носитель способна набрать скорость, значительно превышающую скорость реактивной газовой струи, чтобы выйти на околоземную орбиту и даже улететь в более далекие области Солнечной системы (о развитии современных одноступенчатых ракет см. 3).

## Движение по орбите вокруг Земли

Если в момент, когда у нее закончилось топливо, ракета-носитель взлетала вертикально вверх, то она либо упадет обратно на Землю, либо покинет ее навсегда (об этом мы поговорим позже). Но если в момент отключения двигателей скорость ракеты была направлена по горизонтали, она будет вечно кружить вокруг Земли. Поскольку атмосфера больше не влияет на космический аппарат, его траектория теперь зависит только от его инерции и притяжения к Земле, а поскольку сила тяжести придает космическому аппарату ускорение, направленное к центру Земли, его траектория принимает форму гигантского эллипса, огибающего нашу планету.

Космический аппарат движется по околоземной орбите. Орбита — это путь следования какого-либо объекта вокруг небесного тела в состоянии свободного падения. Хотя ускорение космического аппарата в каждый момент времени направлено строго к центру Земли, огромная скорость, направленная по горизонтали, не дает ему упасть на поверхность планеты. В результате космический аппарат в процессе падения всегда “промахивается” мимо Земли (рис. 4.2.4). Чтобы облетать Землю на высоте лишь чуть выше границы атмосферы, он должен лететь с фантастической скоростью 7,9 км/с, и каждые 84 минуты он будет совершать полный оборот вокруг Земли.

Но чем дальше от поверхности Земли пролетает орбита, тем бóльшим будет период обращения — то есть время, необходимое для прохождения полного витка. Во-первых, раз летательный аппарат должен пройти большее расстояние, чтобы полностью обогнуть Землю по более длинной орбите, путешествие займет больше времени. Во-вторых, чтобы остаться на орбите, ему придется лететь медленнее, потому что по мере удаления от поверхности Земли земное притяжение слабеет.

Я уже говорил в первой главе, что все тела во Вселенной притягиваются друг к другу (см. ❶). В частности, тела притягиваются к Земле. Вблизи земной поверхности вес тела равен его массе, умноженной на ускорение свободного падения (9,8 Н/кг). Но по мере удаления от центра Земли ускорение свободного падения уменьшается. Уравнение 1.2.1 — это приближенная формула, справедливая для тел вблизи земной поверхности и для условий, когда высота существенно не меняется.

Силы притяжения двух тел друг к другу связаны с их массами и расстоянием между ними более общим уравнением: эти силы равны произведению гравитационной постоянной на массы обоих тел, деленному на квадрат расстояния между ними. Это соотношение, открытое Ньютоном, получило название закона всемирного тяготения:

$$\text{сила} = \frac{\text{гравитационная постоянная} \times \text{масса}_1 \times \text{масса}_2}{(\text{расстояние между массами})^2} \quad (4.2.2)$$

Заметим, что сила, приложенная к массе<sub>1</sub>, направлена к массе<sub>2</sub>, а сила, приложенная к массе<sub>2</sub>, направлена к массе<sub>1</sub>. Эти две силы равны по величине и противоположно направлены. Гравитационная постоянная — это фундаментальная постоянная, равная  $6,6720 \times 10^{-11}$  Н·м<sup>2</sup>/кг<sup>2</sup>.

#### Закон всемирного тяготения

Любые два тела во Вселенной притягиваются друг к другу с силой, равной гравитационной постоянной, умноженной на произведение масс обоих тел, деленное на квадрат расстояния между ними.

Этот закон описывает все гравитационные взаимодействия как между двумя планетами, так и между вами и Землей. Действующая масса тела сосредоточена в его центре масс, поэтому под расстоянием в уравнении 4.2.2 подразумевается расстояние между центрами масс двух тел\*. Для космического летательного аппарата, который движется по орбите вокруг Земли у границы атмосферы, это расстояние приблизительно равно радиусу Земли — 6378 км. Но если орбита проходит далеко от границы атмосферы, оно увеличивается, а сила притяжения слабеет. Ускорение свободного падения летательного аппарата становится меньше. Чтобы получить дополнительное время на совершение полного оборота по высокой околоземной орбите, такой космический аппарат должен лететь медленнее, чем по низкой орбите. При меньшей скорости период обращения по высокой орбите увеличивается.

На высоте 35900 км над Землей орбитальный период составляет 24 часа. Спутник, который летит на такой высоте на восток, поворачивает вместе с Землей — такой спутник называют геосинхронным. Если геосинхронный спутник облетает Землю по экватору, он является геостационарным — он всегда находится над одной и той же точкой поверхности Земли. Такая постоянная ориентация важна для телекоммуникационных и метеоспутников.

Не все орбиты круговые. Некоторые космические аппараты летают по эллиптическим орбитам, и их абсолютная высота периодически увеличивается и уменьшается. В апогее, на максимальном удалении от центра Земли, космический аппарат движется относительно медленно, так как часть его кинетической энергии переходит в потенциальную энергию в поле сил тяготения. В перигее, в самой близкой к центру Земли точке орбиты, скорость его становится относительно выше, потому что потенциальная энергия переходит в кинетическую. Разумеется, в перигее космический аппарат не достигает атмосферы Земли, иначе он разрушился бы\*\*.

Орбита космического аппарата может быть и гиперболической. При достаточно большой скорости аппарата Земля не успеет изогнуть его траекторию и замкнуть ее в кольцо, и космический корабль по инерции устремится в меж-

❶ Английский физик Генри Кавендиш (1731–1810) доказал, что на Земле все тела действуют друг на друга с силами притяжения. В 1798 году он с помощью высокочувствительных крутильных весов экспериментально измерил очень слабые силы взаимодействия двух металлических шаров. Сравнил эти силы с силами взаимодействия тех же шаров с Землей (то есть с их силами тяжести), Кавендиш смог вычислить массу Земли.

\* Это справедливо, если каждое из тел имеет центрально-симметричное распределение массы. Это приблизительно справедливо, если расстояние между телами существенно превышает их размеры. Но сила притяжения двух тел сложной формы, расположенных на расстоянии, сравнимом с их размерами, не описывается уравнением 4.2.2.

\*\* У земной атмосферы нет резкой границы, ее плотность падает постепенно. Атмосфера влияет на полет космических аппаратов, только если перигей находится на высотах менее 700 км над поверхностью Земли. Нагрев и разрушение аппарата возможны только на сравнительно малых высотах, не превышающих 200 км.

\* Это было бы совершенно справедливым, если бы человечество имело достаточно мощные и экономичные ракетные двигатели. Но пока что их нет, и приходится изо всех сил набирать скорость, не тратя топливо, но используя притяжение небесных тел (так называемый гравитационный маневр).

планетное пространство. Траектория корабля вблизи Земли принимает вид гиперболы. Космический аппарат пролетает по гиперболической траектории лишь один раз, после чего навсегда удаляется от Земли.

На гиперболическую орбиту летательный аппарат обычно выходит за счет работающего двигателя\*. Сначала он летит вокруг Земли по эллиптической орбите и при работающем ракетном двигателе наращивает кинетическую энергию. Затем он удаляется от Земли по дуге, и его кинетическая энергия постепенно переходит в потенциальную. Но с расстоянием земное притяжение слабеет, и потенциальная энергия в поле сил тяготения медленно приближается к максимальному значению даже на бесконечном удалении от Земли. Если кинетической энергии летательного аппарата хватит на то, чтобы потенциальная энергия приблизилась к максимуму, он сможет полностью преодолеть земное притяжение.

Скорость, необходимая для преодоления космическим летательным аппаратом земного притяжения, называется скоростью освобождения, или второй космической скоростью. Она зависит от высоты положения летательного аппарата, а вблизи поверхности Земли примерно равна 11,2 км/с. При более высокой скорости космический летательный аппарат выходит на гиперболическую орбиту и может улететь к другим планетам Солнечной системы, а то и дальше.

### Распространенное заблуждение: астронавты и "невесомость"

**Заблуждение:** На околоземной орбите астронавт слишком удален от Земли, чтобы на него действовала сила земного притяжения, и он на самом деле ничего не **весит**.

**На самом деле:** Астронавт все еще так близко к Земле, что его вес на корабле почти такой же, как на поверхности планеты. Ему только кажется, что он невесом, потому что он находится в состоянии свободного падения.

### На солнечной орбите; законы Кеплера

После выхода из зоны земного притяжения и очередного отключения двигателя космический аппарат начинает вести себя подобно крошечной планете, которая вращается по орбите вокруг Солнца. Если внимательно понаблюдать за его полетом и сравнить его орбитальное движение с движением настоящих планет, можно заметить, что все солнечные орбиты имеют три общих свойства. Немецкий астроном Иоганн Кеплер (1571–1630) проанализировал обширный научный материал, собранный датским астрономом Тихо Браге, и впервые сформулировал эти правила, которые теперь носят название законов Кеплера.

С первым законом Кеплера мы познакомились, когда изучали околоземные орбиты. Этот закон описывает форму замкнутой траектории движения тела (в данном случае космического аппарата) вокруг Солнца: это эллипс, в одном из фокусов которого находится Солнце (рис. 4.2.5). Эллипс — это не произвольный овал, а плоская кривая с двумя фокусами, причем сумма расстояний от любой точки на кривой до этих фокусов постоянна. В данном случае один из фокусов занят Солнцем, а другой — свободен. Если сложить расстояния от летательного аппарата до Солнца и до второго фокуса, их сумма останется постоянной, пока аппарат не покинет орбиту. Круговая орбита — это частный случай эллиптической; фокусы совпадают, и Солнце находится в обоих сразу.



Рис. 4.2.5. Космический летательный аппарат движется вокруг Солнца по эллиптической орбите, в одном из фокусов которой находится Солнце, в то время как второй фокус не занят. Для любой точки на эллипсе сумма расстояния 1 и расстояния 2 постоянна.



Кеплер показал, что траектория орбитального движения любого тела вокруг Солнца представляет собой эллипс. Планеты описывают эллипсы, приближенные к окружности, а кометы — более вытянутые. Орбита нашего космического летательного аппарата может быть как округлой, так и вытянутой, в зависимости от его положения и скорости в момент выключения двигателя. Для того чтобы космический аппарат попал на другую планету, его орбита, по которой он обращается вокруг Солнца, и орбита этой планеты должны пересекаться, причем оба тела должны оказаться в точке пересечения одновременно. Перебраться с одной планеты на другую — довольно мудреное дело.

Позднее Ньютон доказал, что эллиптическая форма орбиты вытекает из закона всемирного тяготения (уравнение 4.2.2) и обратной пропорциональности силы квадрату расстояния (сила  $\propto 1/\text{расстояние}^2$ , где знак  $\propto$  означает пропорциональность). Любое другое соотношение силы и расстояния приводит к искривлению траектории движения, так что она не только не образует эллипс, но даже не замыкается. Совершив оборот вокруг Солнца по эллиптической орбите, вы могли бы представить изычное доказательство закона всемирного тяготения.

### Первый закон Кеплера: орбиты

Все планеты движутся по эллиптическим орбитам, в одном из фокусов которых находится Солнце.

Второй закон Кеплера говорит о площади, которую покрывает отрезок, соединяющий Солнце и космический аппарат, — за равные промежутки времени этот отрезок (радиус-вектор) покрывает равные площади (рис. 4.2.6). Независимо от положения космического аппарата на эллиптической орбите и степени вытянутости эллипса, площадь сектора, образованного поворачивающимся радиус-вектором (отрезком), в каждую секунду одна и та же.

Этот факт служит иллюстрацией к другому закону физики — закону сохранения момента импульса. Сила притяжения тянет летательный аппарат прямо к Солнцу, поэтому момент силы на него не действует и момент импульса летательного аппарата относительно Солнца не меняется. Отметим, что скорость перемещения радиус-вектора пропорциональна моменту импульса летательного аппарата, поэтому равномерность этого перемещения подтверждает постоянство момента импульса.

### Второй закон Кеплера: площади

Отрезок прямой, соединяющий Солнце и планету, за равные промежутки времени описывает равные площади.

Третий закон Кеплера относится к периоду обращения летательного аппарата вокруг Солнца: квадрат периода обращения по орбите пропорционален кубу среднего удаления летательного аппарата от Солнца, то есть среднему арифметическому перигелия (наименьшего расстояния до Солнца, рис. 4.2.7) и афелия (наибольшего расстояния до Солнца)\*. Это соотношение может быть выведено из закона всемирного тяготения (уравнение 4.2.2), формулы для центростремительного ускорения (уравнение 3.3.1) и второго закона Ньютона (уравнение 1.1.2).

### Третий закон Кеплера: орбитальный период

Квадрат орбитального периода (периода обращения) планеты пропорционален кубу среднего удаления ее от Солнца.

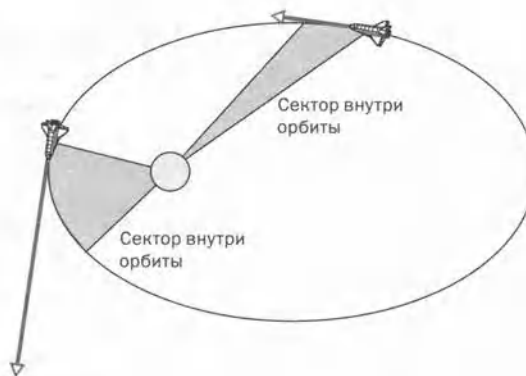


Рис. 4.2.6. Космический летательный аппарат, двигаясь по орбите, за каждую единицу времени “заметает” сектор одной и той же площади, хотя расстояние от корабля до Солнца меняется. Равенство площадей объясняется постоянством момента импульса космического аппарата относительно Солнца.



Рис. 4.2.7. Квадрат периода обращения по орбите пропорционален кубу среднего расстояния летательного аппарата от Солнца, то есть среднему арифметическому перигелия и афелия.

\* Это среднее арифметическое называется длиной большой полуоси эллипса.

Возможно, наступит день, когда невероятно сложные технологические проблемы будут все же решены и шлютируемый космический корабль выйдет за пределы Солнечной системы и возьмет курс к звездам. Но успеть долететь туда в течение своей жизни астронавты успеют лишь в том случае, если скорость космического корабля будет поистине фантастической, близкой к скорости света.

Если когда-либо космический корабль сможет развить такую невероятную скорость, выяснится, что основные законы механики, которые были открыты Галилеем и Ньютоном и которые мы изучали до сих пор, не всегда справедливы. При обычных скоростях эти законы работают идеально, однако при скоростях, близких к скорости света (которая составляет 299 792 458 м/с), дают сбой. Похоже, их стоит считать лишь частным, описывающим механику малых скоростей, случаем более точных законов механики, которые сформулировал в 1905 году Эйнштейн (см. ⑤).

Построенные на наблюдении, что скорость света постоянна независимо от инерционной системы наблюдателя, эти законы релятивистского движения действительны для любых скоростей. Они входят в специальную теорию относительности Эйнштейна — концептуальную модель, которая описывает космос, время и движение в отсутствие гравитации.

В разделе 1.1 мы видели, что наблюдатели в разных инерциальных системах отсчета по-разному оценивают положение и координаты одного и того же тела. Специальная теория относительности гласит, что эти наблюдатели так же по-разному оценивают расстояние и время, разделяющее два события. В более широком смысле, если два наблюдателя в инерциальных системах отсчета движутся относительно друг друга, они воспринимают пространство и время каждый по-своему. Если они движутся с обычными скоростями, различиями в их восприятии можно пренебречь, и тогда законы Ньютона практически не имеют исключений. Но если скорость перемещения одного из наблюдателей относительно другого составляет существенную долю скорости света, то они по-разному ощущают пространство и время. В этом случае ньютоновские приближения не работают и вступает в силу полная версия законов теории относительности.

Специальная теория относительности влияет на многие характеристики движения при высоких скоростях, но нас интересует то, как она меняет две знакомые нам сохраняющиеся величины — импульс и энергию. При низких скоростях импульс космического корабля принимает свой обычный ньютоновский вид — масса, умноженная на скорость (равенство 2.3.1). Однако с увеличением скорости появляется новый релятивистский фактор: —  $(1 - \text{скорость}^2 / \text{скорость света}^2)^{-1/2}$ . Релятивистский импульс равен произведению массы тела на скорость и на релятивистский фактор:

$$\text{релятивистский импульс} = \frac{\text{масса} \times \text{скорость}}{\sqrt{1 - \text{скорость}^2 / \text{скорость света}^2}} \quad (4.2.3)$$

При обычных скоростях релятивистский фактор практически равен 1, так что это уравнение релятивистской механики превращается в ньютоновское. Но как только скорость космического корабля начинает приближаться к скорости света, релятивистский фактор нарушает простую пропорциональность между импульсом и скоростью. Импульс растет быстрее скорости. Это, в частности, приводит к тому, что невозможно достичь скорости света и уж тем более превысить ее. Даже если реактивная сила будет увеличивать импульс космического корабля с постоянной скоростью, его скорость будет нарастать чем дальше, тем медленнее. Она приблизится к скорости света, но никогда не сравняется с ней.

Похожим образом меняется и энергия космического корабля при скоростях, близких к скорости света. При низких скоростях кинетическая энергия изолированного космического корабля определяется ньютоновским уравнением и составляет половину произведения массы корабля на квадрат его скорости (уравнение 2.2.1). А при высоких скоростях приходится учитывать релятивистскую энергию. Релятивистская энергия равна произведению массы тела на квадрат скорости света и на релятивистский фактор, что можно записать как:

$$\text{релятивистская энергия} = \frac{\text{масса} \times \text{скорость света}^2}{\sqrt{1 - \text{скорость}^2 / \text{скорость света}^2}} \quad (4.2.4)$$

⑤ В 1905 году Альберт Эйнштейн — в то время служащий патентного бюро в Берне — опубликовал три статьи, которые произвели переворот в трех областях физики. Для 26-летнего выпускника цюрихского Политехникума это был знаменательный год. Эйнштейна принято изображать пожилым, седовласым господином, однако свой самый важный вклад в науку он сделал, будучи бодрым молодым человеком, всего два года как сыгравшим свадьбу со своей первой женой.

При обычных скоростях релятивистская энергия космического корабля рассчитывается по приближительной формуле:

$$\text{релятивистская энергия} \approx \text{масса} \times \text{скорость света}^2 + 1/2 \times \text{масса} \times \text{скорость}^2.$$

В правой части этого уравнения присутствует обычная ньютоновская кинетическая энергия, зато левое слагаемое представляет собой новый вид энергии, с которым мы еще не встречались. Это остаточная энергия, она есть даже у неподвижного космического корабля. Как величина постоянная, энергия покоя не влияет на движение при низких скоростях и в законах Ньютона не учитывается. Однако эта энергия, связанная с массой и выраженная формулой  $E = mc^2$ , имеет огромное значение и из всей специальной теории относительности, безусловно, известна лучше всего.

Что касается нашего звездолета, релятивистская энергия важна для него в двух отношениях. Во-первых, энергия корабля возрастает так стремительно по мере его приближения к скорости света, что он никогда не сможет достичь последней. Во-вторых, начальный запас энергии космического корабля перед запуском связан с его начальной массой. Об этой весьма тесной зависимости мы еще поговорим в главе 16.

## Долететь до звезд: общая теория относительности

В окрестностях далеких звезд и других крупных небесных тел наш космический корабль, вероятно, столкнется с новым неожиданным препятствием — ньютоновская теория тяготения также оказывается лишь приближением! Вблизи очень массивного тела, обладающего высокой плотностью, сила притяжения уже не так строго подчиняется ньютоновскому закону всемирного тяготения. Теперь для понимания природы и действия сил тяготения нужна новая концептуальная модель — ею и стала общая теория относительности, впервые представленная Эйнштейном в 1916 году.

Эта новая теория исходит из того, что известно нам по опыту, — отличить воздействие направленной вниз силы тяжести от эффекта направленного вверх ускорения невозможно. Как мы видели в разделе 3.3, эти факторы проявляют себя одинаково. Например, когда вы находитесь на космическом корабле, вы не можете определить, действует ли на вас сила тяжести, обусловленная направленным вниз тяготением, или перегрузка, вызванная направленным вверх ускорением. И бортовые приборы вам не помогут, так как они тоже не смогут различить эффекты, произведенные силой тяготения и ускорением. Как бы старайтесь, разницы вы не уловите.

В сущности, это связано с понятием массы. Вплоть до сего момента мы видели, что масса проявляет себя в двух вроде бы различных видах — как гравитационная масса и как инертная. Когда вы испытываете воздействие силы тяжести, вы ощущаете себя в результате совместного проявления гравитационной массы и гравитации. Когда же вы испытываете перегрузку, чувство тяжести вызывается одновременным действием инертной массы и ускорения. Но оказывается, что, несмотря на разные роли, обе массы взаимосвязаны.

Тело с большой инертной массой, которое трудно растрясти, неизбежно имеет и большую гравитационную массу, из-за чего трудно компенсировать его силу тяжести. На самом деле всегда оказывается, что эти массы — одно и то же. Этот факт навел Эйнштейна на идею принципа эквивалентности: гравитационная и инертная массы абсолютно идентичны, и, следовательно, на борту космического корабля невозможно экспериментальным путем отличить свободное падение от отсутствия гравитации. На этом принципе эквивалентности базируется общая теория относительности.

Пока космический корабль остается в поле слабой гравитации, его движение хорошо подчиняется ньютоновскому закону всемирного тяготения. Но при экстремальной гравитации нужна общая теория относительности. Эта теория описывает вселенную, в которой массивные тела искажают структуру пространства и времени рядом с собой, а экстремальные массы вызывают экстремальные искажения. На основании этой теории была высказана одна из самых удивительных идей — предположение о том, что существуют объекты, столь радикально искажающие в своих окрестностях время и пространство, что их называют черными дырами: гравитационное притяжение этих сфер (или почти сфер) столь велико, что покинуть их не могут даже кванты света. Некоторое количество черных дыр

удалось обнаружить, в том числе одну — гигантскую — в центре нашей Галактики. Понятно, что от них лучше держаться подальше.

## История и типы ракет

Ракеты появились в XIII веке в Китае как одно из следствий изобретения пороха. При горении пороха, заложенного в бумажную или бамбуковую трубку, из открытого конца трубки вырывался поток газов, который посылал бумажную ракету вперед. Для стабилизации ракеты к ее задней части прикрепляли длинный направляющий шест. Благодаря торчащему шесту аэродинамические силы обеспечивали ракете динамическую устойчивость при вращении. После старта ракета с шестом-стабилизатором летела быстро, но ее приходилось крепко держать во время запуска. Наибольшего совершенства этот тип ракет достиг в XVIII столетии, когда британский полковник Уильям Конгрив сконструировал боевую ракету со стабилизатором в виде шеста, способную пролететь несколько километров. Ракеты Конгрива широко использовались в военных действиях, в частности при бомбардировке форта Мак-Генри во время англо-американской войны 1812 года. Американский поэт Фрэнсис Скотт Ки увековечил оборону форта в словах гимна США.

В середине XIX века англичанин Уильям Хейл использовал вместо шеста направляющие лопатки, закрепленные вокруг сопел ракеты. Лопатки были изогнуты таким образом, что поток исходящих реактивных газов заставлял ракету вращаться вокруг своей оси. Благодаря вращению такие ракеты оказались точнее реактивных снарядов с шестом: в процессе вращения сглаживались неравномерности реактивного потока, и ракета летела по более прямой траектории.

О возможности применения жидкого ракетного впервые заговорил в 1895 году Константин Циолковский — школьный учитель из России (см. ❸). Ракеты на твердом топливе более надежны, и их проще построить (рис. 4.2.8), но они накапливают меньше химической потенциальной энергии на килограмм массы, чем ракеты с жидкостным двигателем. Кроме того, последние способны произвольно регулировать реактивную силу, что невозможно в случае твердого топлива. Циолковский понял, что сжиженные кислород и водород запасают больше химической энергии на килограмм, чем любые другие вещества — за исключением разве что такой редкой пары, как фтор и водород, — и предложил эту смесь в качестве жидкого ракетного топлива.

Однако в начале XX века мало кто понимал, чего можно добиться с помощью ракет, и получить государственное финансирование на подобные исследования было очень трудно. Лишь в 1926 году американец Роберт Годдард запустил первую ракету на жидком топливе. Несмотря на этот успех, правительство США по-прежнему не проявляло интереса к ракетным технологиям, и их развитие шло крайне медленно. В результате лидером ракетостроения стала Германия, где на рубеже 1930–1940-х годов началась интенсивная разработка жидкостных ракет. Созданные под руководством Вернера фон Брауна (1912–1977) баллистические ракеты “Фау-2” стали первыми реактивными снарядами, способными лететь быстрее звука; за пять минут они преодолевали расстояние примерно 200 км. “Фау-2” были мощным и грозным оружием, целый град этих ракет обрушился на Антверпен и Лондон. После войны войска союзников собрали по крупице все технологии производства “Фау-2”. Сам фон Браун был вывезен в США и возглавил разработку американской ракетной программы.

❸ Математик-самоучка и школьный учитель Константин Циолковский (1857–1935) задумался о возможности полетов в космос под влиянием сочинений Жюль Верна. Циолковский первым осознал перспективность жидкого ракетного топлива, предложил принцип управления полетом с помощью реактивной газовой струи и многоступенчатую конструкцию. Циолковский писал не только теоретические труды о космонавтике, но и научно-фантастические произведения о космических путешествиях.



Рис. 4.2.8. Твердотопливный ракетный двигатель представляет собой контейнер, заполненный зарядом твердого топлива. Сердцевина топливного заряда полая, пламя вырывается наружу из середины цилиндра. В процессе сгорания топлива образуется горячий газ, который выходит с ускорением из сопла и толкает двигатель ракеты вперед.

С тех пор жидкотопливные ракеты стали гораздо более совершенными. Инженеры придумали насосы, которые перекачивают к двигателям сотни и даже тысячи килограммов жидкого топлива в секунду (рис. 4.2.9). Система охлаждения сопел космического челнока не дает им сгореть при запуске, так что их можно использовать для нескольких полетов. Самовоспламеняющееся жидкое топливо — химические вещества, способные к самовозгоранию при смешивании, — позволяет сконструировать надежные двигатели, которые можно многократно включать и выключать во время полета. Системы стабилизации и компьютеры дают инженерам возможность управлять движением ракеты с ювелирной точностью. За последние десятилетия космические аппараты с помощью ракетных двигателей улетели очень далеко от Земли, добравшись до самых отдаленных районов Солнечной системы и даже за ее пределы.

## Ионный двигатель

Принцип работы ракетного двигателя необязательно должен быть основан на выбросе разогретого или сжатого газа. В космических летательных аппаратах достаточно широко применяется, в частности, и такой альтернативный вариант, когда сила, приложенная к двигателю, порождается потоком заряженных частиц. В таком двигателе (он называется ионным) определенное вещество (например, ртуть) нагревается до перехода в газообразное состояние. Затем атомы газа под воздействием электричества теряют отрицательно заряженные электроны, а образовавшиеся частицы с положительным зарядом притягиваются к отрицательно заряженному экрану с отверстиями, открывающими выход во внешнее пространство. Ионы с ускорением движутся в сторону экрана. Отдельные частицы ударяются в экран, но большинство пролетает сквозь отверстия и с огромной скоростью выбрасывается в космос.

Во время как скорость истечения реактивной газовой струи химического двигателя составляет всего лишь 16 000 км/ч, ионы покидают ионный двигатель со скоростью около 250 000 км/ч. Если бы вы, стоя посреди замерзшего пруда на абсолютно гладком льду, умудрились бы швырнуть свою кроссовку на восток с такой силой, вас отбросило бы к западному берегу почти со скоростью звука.

На самом деле, чтобы выбраться на берег, достаточно было бы бросить на восток и рисовое зернышко, придав ему скорость 250 000 км/ч! Несмотря на мизерную массу зернышка, столь быстрое его движение говорит о высоком направленном назад импульсе. Вы же, получив такой же, но направленный в противоположную сторону импульс, легко заскользили бы по льду.

Именно в подобном соотношении и заключается одно весьма привлекательное свойство ионного двигателя — для создания силы тяги ему требуется поразительно малый запас рабочего вещества. Для многих космических аппаратов, рассчитанных на длительный срок службы, большей ценностью является не энергия (которую обычно можно обеспечить солнечными батареями), а масса топлива. Космический аппарат для сверхдальних полетов должен из каждого килограмма топлива извлечь как можно больше тяги. В ионном двигателе топливо разгоняется до очень высоких скоростей и поэтому расходуется очень эффективно.

Ионные двигатели используются в космических аппаратах, которым требуется небольшая, но стабильная тяга в течение многих лет. Такие двигатели выбрасывают малые потоки ионов и электронов для получения нужной реактивной силы. Благодаря малому расходу топлива такие двигатели способны годами работать на одном небольшом баке ртути или другого вещества. Чтобы вывести в космос ракету-носитель, силы тяги ионного двигателя не хватит, для этого надо иметь гораздо более мощный двигатель. Но чтобы изменять скорость и траекторию летательного аппарата на орбите, вполне достаточно небольшой реактивной силы.

## Солнечные паруса

Осталось поговорить о последней разновидности космических двигателей. Строго говоря, солнечный парус нельзя назвать двигателем, однако он позволяет развить определенное ускорение, достаточное для неспешных путешествий в пределах Солнечной системы\*. Солнечный парус — это огромная поверхность, которая создает силу тяги, отражая солнечный свет. Свет переносит импульс, и солнечный парус, отражая свет, использует этот импульс.

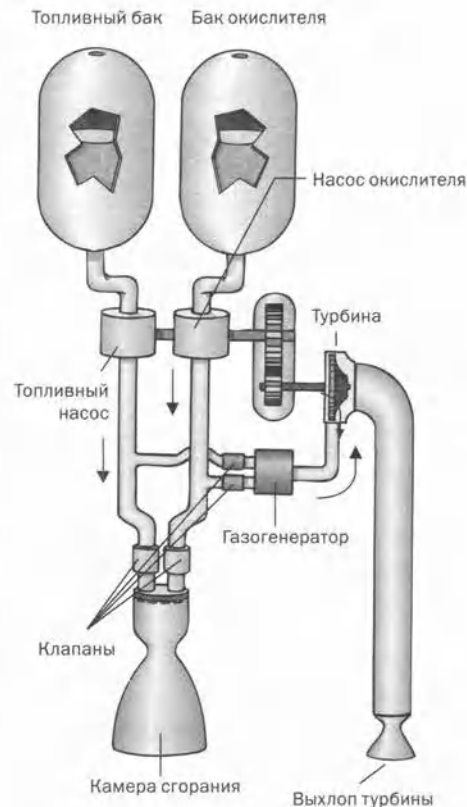
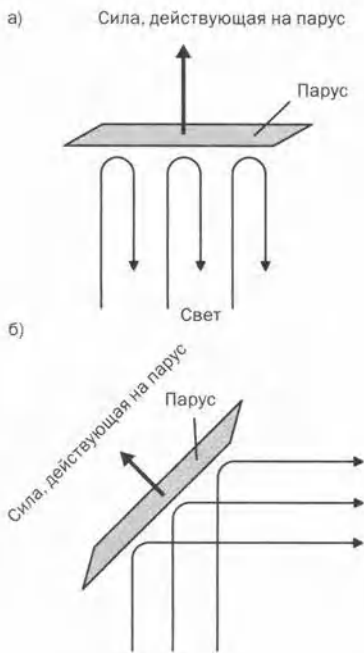
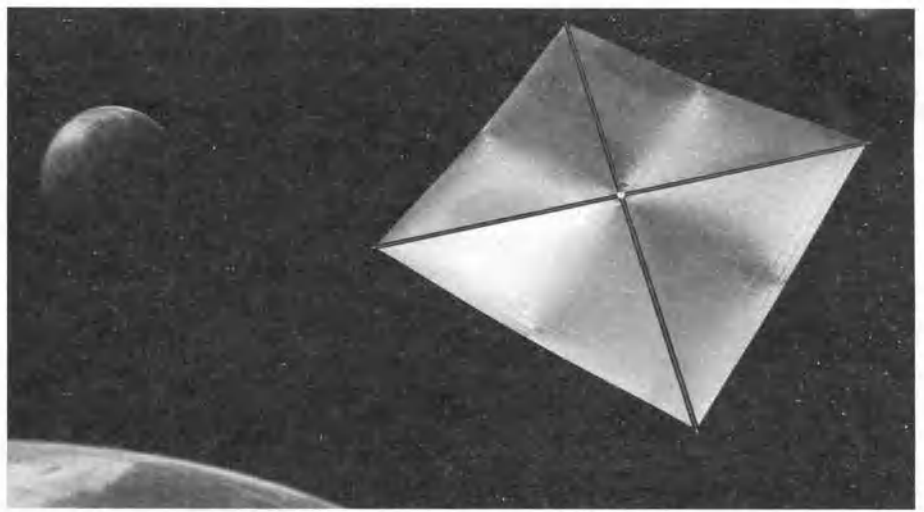


Рис. 4.2.9. В ракетах с двигателем на жидком топливе две жидкости смешиваются и воспламеняются непосредственно в камере сгорания реактивного двигателя. Образовавшийся в результате сгорания горячий газ вырывается с ускорением из сопла и посылает ракету вперед. Сложная газотурбинная насосная система, показанная на рисунке, необходима для подачи гигантских объемов топлива, сгорающего каждую секунду.

\* Ускорение, которое может обеспечить солнечный парус, весьма невелико, и к тому же этот парус бессмысленно пытаться использовать вдали от звезд, в межзвездном пространстве. Долгие путешествия к дальним планетам Солнечной системы — вот возможная сфера его применения.



**Рис. 4.2.10.** Отражающий солнечный парус создает силу тяги, изменяя направление солнечного света. (а) Если свет отражается строго назад, парус получает удвоенный начальный импульс света и испытывает действие относительно большой силы, направленной от Солнца. (б) Если падающие и отраженные лучи образуют прямой угол, сила тяги уменьшается и вектор ее направлен под углом  $45^\circ$  к солнечному свету.



**Рис. 4.2.11.** В этой художественной фантазии на тему солнечного паруса от маленького космического корабля отходят четыре длинные штанги, на которые натянута отражающая пленка гигантской площади. Солнечный свет, отражаясь от пленки, сообщает космическому кораблю свой импульс и создает небольшую, но стабильную силу тяги.

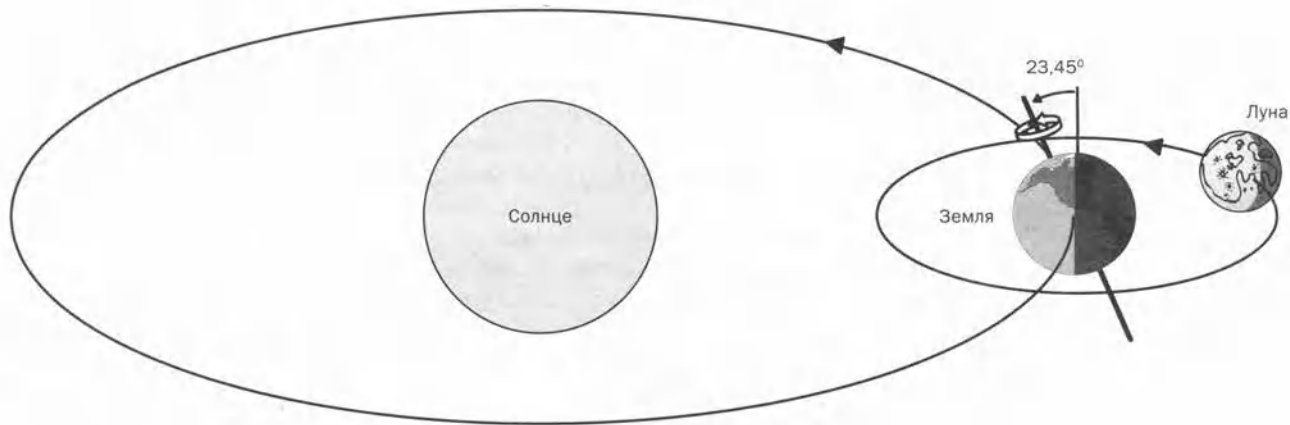
Пожалуй, проще всего будет понять принцип такого двигателя, если представить себе, что свет взаимодействует с веществом как поток частиц — фотонов. Каждый фотон несет маленький импульс, величина которого зависит от цвета луча. Если поверхность поглотит фотон при соударении, он передаст ей весь свой импульс полностью. Происходит то же самое, что при попадании мягкого мячика в мишень — в момент удара мячик сообщает мишени 100% своего направленного вперед импульса.

Но если фотон ударится о поверхность и отразится точно назад, поверхность получит от него удвоенный импульс, направленный вперед. Этот процесс аналогичен удару упругого шарика в мишень и его абсолютно упругому отскоку — при отскоке упругий шарик передает мишени 200% своего направленного вперед импульса, а его собственный конечный импульс направлен назад.

Черный солнечный парус поглощает фотоны солнечного света и получает 100% их импульса. Свет попросту вкладывает весь свой импульс в парус. Но более эффективен солнечный парус с высоким коэффициентом отражения: он не поглощает свет, а меняет его направление на противоположное и таким образом меняет направление его импульса. Свет, словно мяч при упругом отскоке от стенки, сообщает парусу направленный вперед импульс, превышающий его собственный, а сам отражается с импульсом, направленным назад. При этом отражающий солнечный парус получает 200% импульса солнечного света (**рис. 4.2.10, а**). Кроме того, отражающий парус можно поворачивать; подобно парусной яхте, которая может ходить под разными углами к ветру, с помощью паруса отклоняя этот ветер в определенную сторону, так и солнечный парус тоже можно повернуть под тем или иным углом к потоку солнечного света, чтобы отклонить этот поток (**рис. 4.2.10, б**).

Величина силы, которую способен обеспечить солнечный парус, ограничивается очень малым импульсом света. Чтобы получить сколько-нибудь значительную силу тяги, длина одной стороны солнечного паруса должна составлять много километров. Но поскольку масса паруса снижает ускорение всего космического аппарата, он должен быть очень легким. Современные солнечные паруса делают из ультратонкого зеркального пластика, натянутого на тонкую раму (**рис. 4.2.11**). Некоторые модели медленно вращаются, будто исполинская игрушечная вертушка на палочке, и инерция заставляет парус раскрываться.

Пусть солнечный парус позволяет развить крайне небольшую силу тяги, зато ему вообще не требуется топлива. Солнечный парус может годами обеспечивать ускорение, а его максимальная скорость ограничена только скоростью самого света. Если расстояние паруса от Солнца настолько велико, что получить приемлемую тягу невозможно, можно представить себе лазер, направляющий свой луч с Земли и дающий дополнительный световой толчок парусу.



## 4.3 Земля, Луна и Солнце

Одно из самых замечательных открытий Ньютона заключается в том, что небесные тела подчиняются тем же законам механики, что и тела на Земле. До этого открытия Вселенную считали состоящей из двух отдельных частей — мира земного и мира небесного. Ньютон связал эти отдельные сферы единым сводом законов. Оказалось, что динамику планет и звезд можно познать, понять и предсказать.

### Солнечная система

Солнечную систему начали изучать еще в древности, когда люди впервые обнаружили, что некоторые небесные тела перемещаются относительно неподвижных звезд. Все звезды, за исключением Солнца, настолько далеко от нас, что различить их движение в ночном небе практически невозможно. Каждую ночь в одно и то же время года мы видим над собой одно и то же гигантское живописное полотно. А на фоне неподвижных звезд по небу медленно плывут планеты.

Люди довольно рано заметили, что “неподвижные” звезды совершают полный оборот вокруг Земли чуть быстрее чем за сутки. Сейчас мы знаем, что на самом деле это “движение” кажущееся: в действительности вращается Земля, а не небесный свод. Если бы не планеты, можно было бы подумать, что ночное небо — и в самом деле не более чем неподвижная картина. Однако внимательные наблюдатели заметили, что планеты медленно дрейфуют по кругу от одной группы звезд к другой, обходя все небо. Было хорошо видно, как пять наиболее ярких планет — Меркурий, Венера, Марс, Юпитер и Сатурн, — а также Солнце и Луна непрерывно проходят по этому пути с различными скоростями, то обгоняя друг друга, то заметно отставая.

Полоса на небесном своде, вдоль которой проходили пути этих светил, получила название “пояс зодиака” и была разделена на 12 равных отрезков в соответствии с 12 месяцами года. Каждый отрезок был назван именем созвездия, в котором в тот или иной месяц находилось Солнце\*. Примерно в 150 году до н. э., когда великий греческий естествоиспытатель Птолемей описывал известные в то время созвездия, Солнце в день весеннего равноденствия (день начала весны в Северном полушарии, когда продолжительность дня и ночи уравниваются) находилось в созвездии Овна, а в день осеннего равноденствия (то есть начала осени) — в созвездии Весов. Однако постепенное смещение точек весеннего и осеннего равноденствий (это явление называется прецессией или предварением равноденствий) приводит к тому, что области зодиака “сдвигаются” по небу к западу, и сейчас Солнце во время весеннего равноденствия находится в Рыбах, а в осеннее равноденствие — в созвездии Девы.

Когда-то люди думали, что звезды, планеты, Луна и Солнце просто плывут по небу вокруг неподвижной Земли. Загадочное перемещение планет объясняли существованием некоего таинственного механизма, который управляет движением этих небесных тел. До тех пор пока польский астроном Николай Ко-

\* Представление о двенадцати зодиакальных созвездиях существуют только в массовой культуре и в астрологии. Заглянув в любой справочник по астрономии, вы обнаружите тринадцать зодиакальных созвездий: обычно при их перечислении пропускают созвездие Змееносца. Солнце находится в нем с 27 ноября по 17 декабря.

перник (1473–1543) не опубликовал свои труды, нелегко было представить себе, что Земля тоже участвует в небесном движении. Коперник предположил, что центром Вселенной является Солнце, а Земля вращается по орбите вокруг него. Затем немецкий астроном Иоганн Кеплер (1571–1630), основываясь на результатах своего учителя Тихо Браге (1546–1601), доказал справедливость теории Коперника и сформулировал три важных закона движения планет. Позже сэр Исаак Ньютон, основываясь скорее на наблюдениях, нежели на теоретических принципах физики, вывел эти эмпирические законы.

Хотя в разделе 4.2 мы уже познакомились с законами Кеплера, хочу воспользоваться случаем, чтобы напомнить кое-какие главные моменты. Во-первых, Кеплер заметил, что все планеты движутся вокруг Солнца по эллиптическим орбитам. Кроме того, эллиптические орбиты большинства планет очень близки к окружности. Во-вторых, Кеплер обнаружил, что чем больше орбита, тем больше орбитальный период, то есть время, необходимое планете на совершение полного оборота вокруг Солнца, и выяснил, что орбитальный период пропорционален радиусу орбиты в степени  $3/2$ . Скажем, если радиус земной орбиты станет вдвое больше, время, необходимое для полного оборота Земли вокруг Солнца, увеличится в  $2^{3/2}$  (то есть примерно в 2,8) раза. Иными словами, период обращения Земли вокруг Солнца составит 2,8 нынешнего года.

Теперь я объясню видимое движение планет вдоль пояса зодиака. Проследим перемещение двух планет, Земли и Марса, в течение нескольких месяцев (рис. 4.3.1). Вначале наблюдатель, который смотрит с Земли на Марс, видит его в определенном созвездии. Спустя полтора месяца Земля проделает 12,5% своего пути по орбите, в то время как Марс пройдет по своей орбите только 6,6% пути — ведь радиус орбиты Марса больше радиуса земной орбиты, и его период обращения равен 1,88 года. Наблюдатель с Земли увидит, что теперь Марс находится в другом созвездии. Таким образом, положение каждой планеты относительно неподвижных звезд зависит от ее положения на орбите и от положения Земли.

С точки зрения наблюдателя, находящегося на Земле, Солнце также “перемещается” относительно звезд. Поскольку Земля проделывает свой путь вокруг

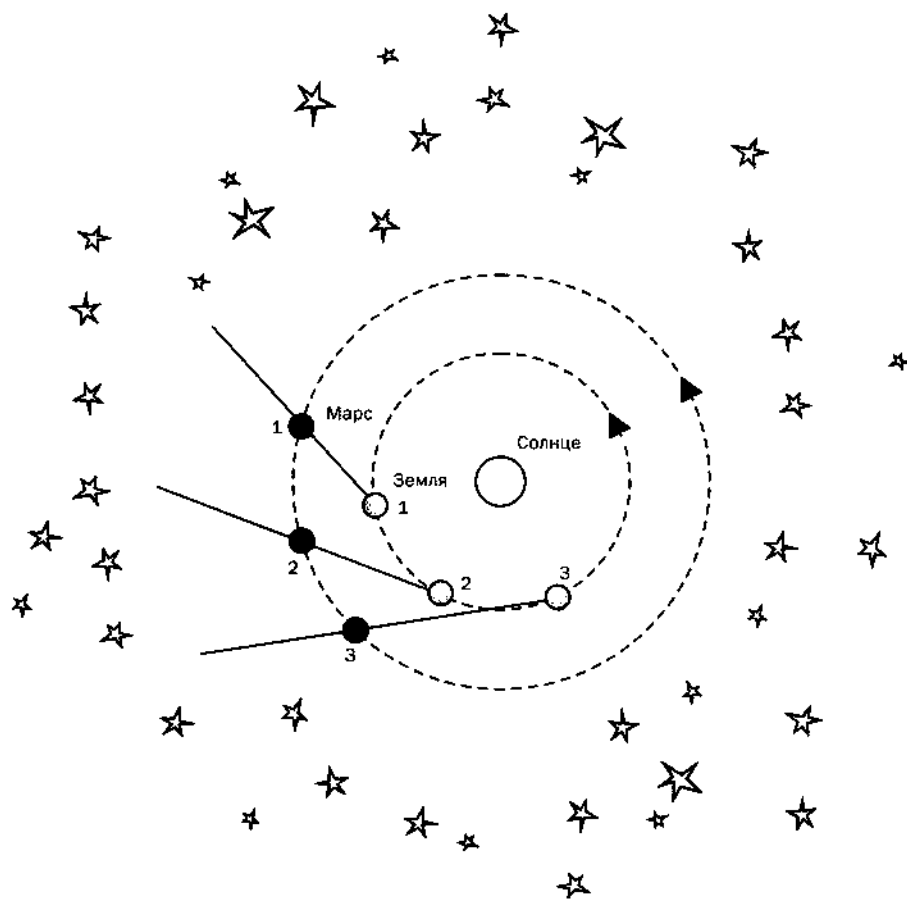


Рис. 4.3.1. Планеты Солнечной системы движутся вокруг Солнца с разными скоростями. Земля делает полный оборот за год, а Марс, радиус орбиты которого больше, проходит весь путь за 1,88 земного года. Наблюдатель с Земли сначала видит Марс в одном созвездии, затем в другом, потом в третьем.



Солнца за год, нам кажется, будто Солнце в течение года проходит вдоль всего зодиакального пояса неподвижных созвездий.

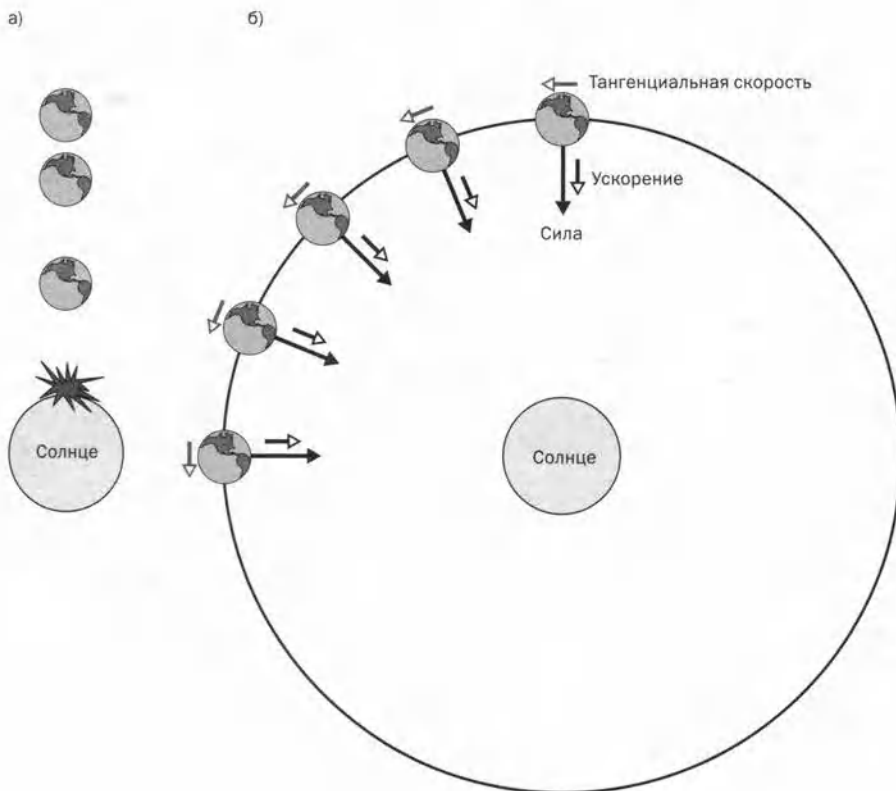
Совсем иное дело — обращение Луны вокруг Земли. Как мы вскоре узнаем, Луна обходит по кругу близко расположенную к ней Землю, при этом сопровождая последнюю на ее пути вокруг Солнца. Луна совершает полный оборот вокруг Земли за 27,32 дня, поэтому нам кажется, что она проходит по поясу зодиака очень быстро.

## Иной взгляд на орбиты

Поскольку структура Солнечной системы построена в основном из эллиптических орбит, давайте взглянем на них с иной точки зрения. Представим на минуту, что в Солнечную систему входят только Солнце и Земля. Они действуют друг на друга с силами притяжения, так что ускорение Земли направлено к Солнцу, а ускорение Солнца — к Земле. Но Солнце в 333 000 раз тяжелее Земли и вряд ли имеет какое-то ускорение. Следовательно, практически все движение приходится совершать Земле.

Можно было бы ожидать, что Земля, имея большое ускорение, наберет высокую скорость и врежется в Солнце. К счастью, ни Земля, ни Солнце не теряют стабильности, иначе случилось бы то, что вы видите на **рис. 4.3.2, а**. В действительности ускорение Земли и впрямь направлено к Солнцу, однако ее начальная тангенциальная скорость (то есть направленная перпендикулярно направлению на Солнце) не дает ей упасть на Солнце (**рис. 4.3.2, б**). Если бы не сила притяжения, тангенциальная скорость увела бы Землю прочь от Солнца. Ускорение Земли направлено к Солнцу, поэтому вектор тангенциальной скорости поворачивается к нему.

Приложенная к Земле сила притяжения является центростремительной силой, она всегда направлена к почти неподвижному Солнцу. Ускорение Земли — это также центростремительное ускорение. Тангенциальная скорость Земли постоянно меняется, и траектория планеты изгибается в пространстве по очень широкой эллиптической дуге. По прошествии года эта дуга замыкается, образуя близкий к кругу эллипс. Этот эллипс и есть орбита Земли в космосе.



**Рис. 4.3.2.** Силы притяжения, возникающие между Землей и Солнцем, вынуждают их двигаться друг к другу с ускорением. Ускорение менее массивной Земли намного больше, чем ускорение Солнца. (а) Если бы Земля начала движение из состояния покоя, ее ускорение, направленное к Солнцу, привело бы к росту ее скорости и катастрофическому столкновению с Солнцем. (б) Однако Земля имеет большую тангенциальную скорость относительно Солнца, направленную перпендикулярно линии, которая соединяет два небесных тела. Ускорение Земли направлено к Солнцу, но по мере перемещения к левому нижнему углу приведенной схемы Земля пролетает мимо Солнца и обходит его по эллиптической орбите. Ускорение Земли всегда направлено к Солнцу, но ее тангенциальная скорость не дает ей врезиться в него.

Поскольку орбита Земли близка к окружности, Земля совершает равномерное круговое движение относительно Солнца. Однако Земля так велика, что сила ее притяжения к Солнцу слегка меняется от ближнего к светилу края планеты к дальнему. Та сторона Земли, что обращена к Солнцу, испытывает более значительное притяжение и, если бы это было возможно, двигалась бы по орбите с меньшим радиусом. Дальняя сторона Земли, та, что обращена от Солнца, притягивается к светилу слабее, и радиус ее орбиты мог бы быть больше. Но Земля достаточно прочная, поэтому вся целиком движется по одной орбите. Однако земные океаны более подвижны, чем жесткая поверхность суши, и на них разность притяжений сказывается довольно заметно. На ближней к Солнцу стороне Земли поверхность океана как бы вспучивается в сторону светила, а на дальней, наоборот, «втягивается» в сторону центра Земли. В разделе 9.3 мы поговорим о том, каким именно образом неравномерное притяжение Солнца и Луны создает на Земле приливные силы и как связан с этим явлением подъем воды в океане.

Крошечная Земля бежит, словно на поводке, вокруг гигантского светила по траектории, близкой к окружности. Роль поводка играет сила притяжения. Поскольку скорость Земли направлена под прямым углом к направлению силы солнечного притяжения, эта сила не может подтянуть планету ближе к светилу. Чем дальше та или иная планета от Солнца, тем слабее сила солнечного притяжения, поэтому период обращения по более удаленной орбите больше, чем по более близкой к Солнцу. Планеты, расположенные ближе к Солнцу, обходят его быстрее, как если бы поводок был лучше натянут. Удаленные от Солнца планеты вращаются вокруг него медленнее, словно держатся на более тонкой, непрочной ниточке.

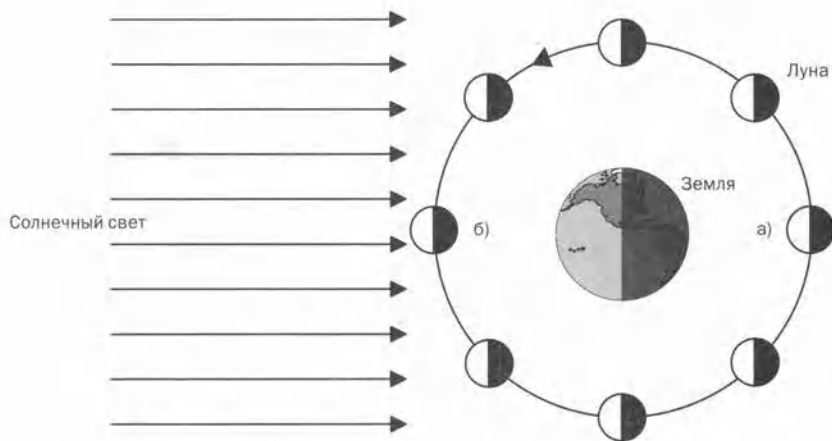
Кажется удивительным, что концам земной орбиты удается встретиться после каждого оборота вокруг Солнца. Это происходит потому, что сила притяжения обратно пропорциональна квадрату расстояния от Земли до Солнца. — эту закономерность мы обсуждали в разделе 4.2. Орбиты могут формироваться и под влиянием других разновидностей центростремительных сил, но эти орбиты обязательно окажутся замкнутыми. Например, если вы прикрепите к мячику конец эластичной резиновой ленты и раскрутите его над головой, то мяч будет летать по сложной траектории, которая никогда не замкнется. Дело в том, что центростремительная сила, создаваемая резиновой лентой, не пропорциональна единице, деленной на квадрат расстояния от вашей руки до мяча.

Солнце тоже имеет ускорение, направленное к Земле, но его колоссальная масса не позволяет ему набрать большую скорость. Когда крошечная (в сравнении с Солнцем) Земля вращается вокруг него, оно лишь слегка покачивается. Правильнее будет сказать, что эти два тела вращаются вместе вокруг центра масс, общего для них обоих. Поскольку масса Солнца составляет львиную долю массы всей системы, ее центр масс почти совпадает с центром масс Солнца. Другие планеты обращаются вокруг Солнца точно так же, как Земля. Планеты-гиганты Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун намного тяжелее Земли и способны «раскачать» Солнце сильнее, чем наша планета. И все-таки, как правило, можно исходить из допущения, что планеты Солнечной системы движутся по своим круговым орбитам относительно неподвижного Солнца.

Для того чтобы гравитационные взаимодействия между планетами можно было наблюдать, планеты слишком удалены друг от друга. Земля притягивает к себе Марс, и наоборот, но так слабо, что измерить эту силу практически невозможно. Однако Плутон был открыт в 1930 году как раз благодаря тому, что было замечено влияние некоего неизвестного тела на траекторию движения Нептуна вокруг Солнца.

## Луна

На поведении планет мало сказывается присутствие их соседей по Солнечной системе, чего нельзя сказать о спутниках планет. Поскольку расстояние от Земли до Луны невелико — в 400 раз меньше, чем от Земли до Солнца, — то земное притяжение влияет на Луну очень сильно. Земля и Луна движутся вместе, парой. Земля в 80 раз тяжелее своего спутника, поэтому Луна движется гораздо интенсивнее. Луна имеет ускорение, направленное к Земле, и вращается вокруг Земли по орбите, подобно тому как сама Земля вращается по орбите вокруг Солнца. Поскольку



**Рис. 4.3.3.** Фазы Луны возникают из-за того, что мы видим только ее освещенную часть. Если Луна находится дальше от Солнца, чем Земля, освещается большая часть обращенной к нам стороны, и мы видим полную (а) или неполную Луну. Если наш спутник ближе к Солнцу, чем мы, нам видна в основном неосвещенная половина Луны — новолуние (б) или тонкий серп.

система Земля — Луна сравнительно невелика, то наш спутник совершает полный оборот вокруг Земли всего за 27,32 дня. Орбита Луны очень близка к окружности.

27,32 дня — это примерно цикл фаз Луны. Луна выглядит то как большой светлый диск, то как тонкий серп. Чем же объясняются эти фазы?

Фазы Луны объясняются тем, что мы видим лишь ту ее часть, которая освещена Солнцем (**рис. 4.3.3**). Во время движения Луны по орбите вокруг Земли ее обращенная к Земле сторона иногда освещена Солнцем, а иногда погружена в темноту. Когда Луна на своем пути вокруг Земли оказывается в самой удаленной от Солнца точке, мы видим полный, яркий лунный диск — это полнолуние. Когда Луна приходит в ближайшую к Солнцу точку своей орбиты вокруг Земли, освещена ее половина, обращенная прочь от нас. Тогда мы не видим Луну вовсе, и это называется новолунием. В период от новолуния до полнолуния мы наблюдаем освещенную половину Луны не полностью: мы видим то тонкий месяц, то полукруг, то Луну “в ущербе”.

Случается, что Земля оказывается между Луной и Солнцем, на пути солнечных лучей, освещающих наш спутник. В таких случаях Луна попадает в тень Земли и получается лунное затмение: мы видим, как по Луне медленно проплывает огромная круглая тень нашей планеты. На какое-то время эта тень может полностью закрыть Луну. Поскольку лунное затмение возможно только при максимальном удалении Луны от Солнца (**рис. 4.3.3, а**), то оно всегда происходит в полнолуние.

Похожим образом Луна порой преграждает путь к Земле солнечным лучам. С Земли мы видим, как темный лунный диск проходит перед Солнцем и заслоняет его — это солнечное затмение. Луна невелика, и полное солнечное затмение могут наблюдать лишь те счастливицы, которые повезло оказаться в той местности на Земле, где луна на какое-то время полностью закрывает солнечный диск. Поэтому наблюдать солнечное затмение удастся реже, чем лунное. Солнечное затмение возможно только при минимальном удалении Луны от Солнца (**рис. 4.3.3, б**), поэтому оно всегда случается в новолуние.

## Сутки

Мы видим, что Солнце каждое утро встает на востоке и каждый вечер садится на западе. Конечно, мы уже давно знаем, что в действительности наблюдаем вовсе не движение нашего светила, а движение Земли. Земля оборачивается вокруг своей оси примерно за сутки (на самом деле чуть быстрее), и нам кажется, что все небесные тела совершают оборот вокруг Земли примерно за то же время.

Вращаться вокруг своей оси Землю заставляет колоссальный момент импульса, который она получила еще в процессе своего формирования и сохранила благодаря воздействию на нее нескольких моментов сил. Небольшие моменты сил приложены со стороны Солнца и Луны (эти моменты сил вызывают морские приливы), но в основном постоянная скорость, с которой вращается Земля, задается исключительно суммарным моментом импульса и моментом инерции планеты. Каждая точка земной поверхности половину суток обращена к Солнцу, а половину суток — прочь от него.

Астрономические (солнечные) сутки — это промежуток времени между двумя последовательными наивысшими восхождениями Солнца над горизонтом,

то есть период, в течение которого Земля оборачивается вокруг своей оси относительно центра Солнца. Звездные сутки — это промежуток времени, в течение которого Земля совершает полный оборот вокруг своей оси относительно неподвижных звезд. Интересно, что солнечные сутки несколько длиннее звездных; это происходит потому, что в течение суток Земля проходит примерно  $1/365$  часть своего пути по орбите вокруг Солнца и, следовательно, к моменту очередного наивысшего восхождения светила над горизонтом должна совершить лишнюю  $1/365$  часть оборота вокруг оси. Солнечные сутки в среднем делятся 86 400 секунд, а звездные — всего 86 164 секунды.

А какова продолжительность суток на Луне? Прежде чем ответить на этот вопрос, напомним, что Луна всегда обращена к Земле одной и той же стороной. Очень давно Луну “прибили” к ее орбите приливно-отливные эффекты (см. раздел 9.3), которые к тому же деформировали наш спутник так, что он перестал быть идеально круглым.

Лунный звездный месяц — период обращения Луны вокруг Земли относительно неподвижных звезд — составляет 27,32 дня. А поскольку Луна движется по орбите вокруг Земли в одном и том же, навсегда зафиксированном положении, ей надо облететь вокруг Земли, чтобы обернуться вокруг своей оси. На этот полный оборот ей требуется ровно столько же времени — это и есть лунные звездные сутки. Однако за один лунный месяц Земля и Луна прошли примерно  $1/12$  своего пути вокруг Солнца, поэтому, прежде чем Солнце снова взойдет в самую высокую точку на лунном небе, Луна должна будет пройти еще  $1/12$  орбитального пути вокруг Земли (то есть совершить еще  $1/12$  часть оборота вокруг своей оси). В итоге наблюдатель, находящийся на Луне, увидит, что Солнце восходит и заходит каждые 29,53 земных суток.

Нам с Земли не видна обратная стороны Луны, потому что она всегда обращена прочь от нашей планеты. Обратную сторону Луны можно увидеть только с космического аппарата, способного облететь вокруг Луны. Обратную сторону Луны часто называют “темной”, но это ошибка. Обратная сторона Луны — это та, что не видна с Земли, это всегда одна и та же часть лунной поверхности. Однако освещенность этой области Луны (как и всех прочих) меняется в течение лунных астрономических суток, которые делятся 709 часов.

## Времена года

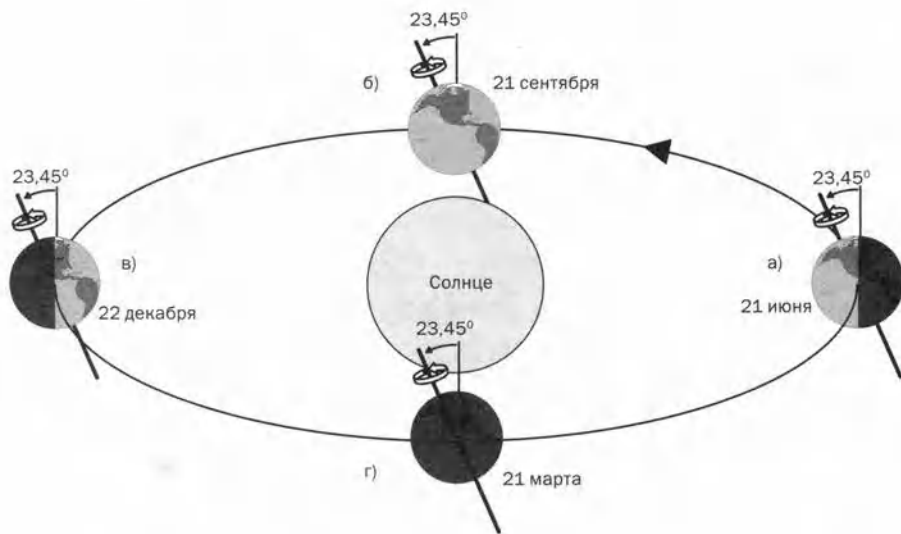
Земля совершает один оборот вокруг своей оси раз в сутки, а вокруг Солнца — раз в год. Если не принимать во внимание изменение положения Солнца относительно неподвижных звезд, каждый следующий день должен быть похож на предыдущий. Почему же происходит смена времен года? Почему зимой дни короче, чем летом?

Ответ на этот вопрос кроется в ориентации земной оси относительно орбиты Земли. Земля описывает вокруг Солнца огромный, близкий к окружности эллипс, который можно представить себе как границу гигантского стеклянного диска. Геометрическую поверхность такого диска мы называем плоскостью орбиты, или орбитальной плоскостью. Если бы ось вращения Земли была направлена перпендикулярно плоскости орбиты, то ситуация на Земле по мере продвижения ее по орбите несильно изменялась бы и все дни года были бы более или менее одинаковы.

Однако земная ось не перпендикулярна орбитальной плоскости, а отклонена от перпендикуляра на  $23,45^\circ$ . А благодаря очень большому моменту импульса Земли ее ось вращения день за днем, месяц за месяцем, год за годом сохраняет ориентацию относительно неподвижных звезд. Северный конец этой оси всегда направлен к яркой Полярной звезде\*.

В течение части года Северное полушарие Земли наклонено к Солнцу (рис. 4.3.4, а), а в течение другой части года — прочь от него (рис. 4.3.4, в). Когда Северное полушарие максимально наклонено к Солнцу — как, например, 21 июня (рис. 4.3.4, а), — то в этом полушарии лето. В летний полдень Солнце стоит высоко, а день значительно длиннее ночи. Севернее Северного полярного круга, который пролегает в  $23,45^\circ$  к югу от Северного полюса, Солнце в течение определенной части лета вообще не опускается за горизонт. Когда Северное полушарие отворачивается от Солнца — как, например, 22 декабря (рис. 4.3.4, в), — в этом полушарии царит зима. Солнце поднимается невысоко, и день намного короче ночи. К северу

\* Направление земной оси все же меняется, хотя и очень медленно. Если сегодня ось вращения Земли направлена на Полярную звезду ( $\alpha$  Малой Медведицы), то в I тысячелетии до н. э. ближе всего к оси была звезда Кохаб ( $\beta$  Малой Медведицы). После 3200 г. ось будет направлена в сторону звезды Альрай ( $\gamma$  Цефея).



**Рис. 4.3.4.** Смена времен года происходит из-за того, что ось вращения Земли наклонена по отношению к плоскости орбиты. Полгода Северное полушарие Земли наклонено к Солнцу, а полгода — от Солнца. Чем сильнее наклон к Солнцу, тем длиннее дни и короче ночи в этом полушарии.

от Северного полярного круга в течение определенного периода зимой Солнце вовсе не появляется.

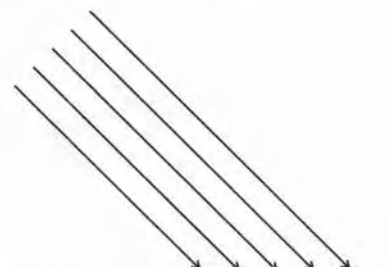
Если Солнце стоит достаточно высоко, средняя температура воздуха повышается. Чтобы объяснить это явление, давайте рассмотрим две ситуации. Когда Солнце стоит низко (**рис. 4.3.5, а**), его лучи падают на Землю косо и интенсивность освещения земной поверхности мала. А когда оно стоит в зените (**рис. 4.3.5, б**), его лучи падают на землю практически под прямым углом и интенсивность освещенности велика. Чем интенсивнее освещается поверхность Земли, тем сильнее прогревается воздух в данной местности. Июнь, июль и август — самые жаркие месяцы к северу от северного тропика именно потому, что в это время Солнце стоит в небе очень высоко и земная поверхность освещается наиболее интенсивно.

В Южном полушарии ситуация обратная. Разгар лета там наступает в районе 22 декабря, а пик зимы — около 21 июня. Южнее Южного полярного круга, опоясывающего Землю на  $23,45^\circ$  севернее Южного полюса, в течение определенной части лета Солнце никогда не садится, а в течение части зимы — никогда не встает.

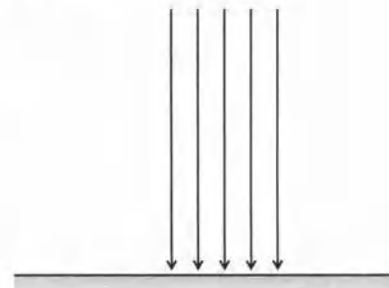
В тропической зоне — климатической полосе, расположенной вдоль экватора, — Солнце в полдень находится иногда ровно в зените. С приходом лета в Северном полушарии границы области, где Солнце можно наблюдать в зените, сдвигаются к северу, а с приближением зимы — к югу. 21 сентября и 21 марта — в дни осеннего и весеннего равноденствия — и верхнее, и Южное полушария наклонены нейтрально по отношению к Солнцу (ось вращения Земли не направлена ни в сторону Солнца, ни прочь от него, **рис. 4.3.4, г**), и на экваторе Солнце стоит прямо над головой. 21 июня северное полушарие максимально наклонено к Солнцу, это день летнего солнцестояния, когда светило стоит прямо над головой на северном тропике (тропике Рака), который проходит на  $23,45^\circ$  северной широты. 22 декабря Северное полушарие максимально отклонено от Солнца — в день зимнего солнцестояния Солнце стоит в зените на южном тропике (тропике Козерога), на  $23,45^\circ$  южной широты.

В действительности представление о том, что ось вращения Земли всегда направлена одинаково, не совсем точно. Со стороны Солнца и Луны на Землю действуют небольшие моменты сил, которые заставляют земную ось очень медленно поворачиваться относительно того положения, которое с плоскости орбиты Земли кажется наблюдателю вертикальным. Это смещение земной оси называется прецессией равноденствий, и полный цикл его завершается за 25 800 лет. По этой причине тропический, или календарный год (период от одного весеннего равноденствия до следующего) немного короче, чем звездный, или сидерический год (период, за который Земля проходит весь путь по орбите вокруг Солнца относительно неподвижных звезд). Из-за прецессии земной оси наивысшая точка, которой достигают звезды в полночь определенных суток в течение года, медленно смещается, поэтому области зодиакального пояса сдвинулись по сравнению с их положением во времена Птолемея.

а) Солнце низко над горизонтом



б) Солнце в зените



**Рис. 4.3.5.** (а) Если Солнце близко к горизонту, его лучи падают на Землю под углом и интенсивность солнечной радиации невелика. (б) Если Солнце стоит в зените, поток его лучей имеет максимальную интенсивность и Земле достается максимум радиации.

Что касается земной орбиты, тут есть еще одна интересная деталь — орбита Земли является не правильной окружностью, а эллипсом. Следовательно, расстояние от Земли до Солнца не везде одинаково. Земля подходит на минимальное расстояние от Солнца 2 января (147 100 000 км, перигелий), а максимально удаляется от него 4 июля (152 100 000 км, афелий). Так что лето в Северном полушарии никак не связано с расстоянием от нашей планеты до Солнца. В действительности, когда в Северном полушарии наступает лето, Земля как раз находится дальше всего от Солнца.

## Прочие объекты Солнечной системы

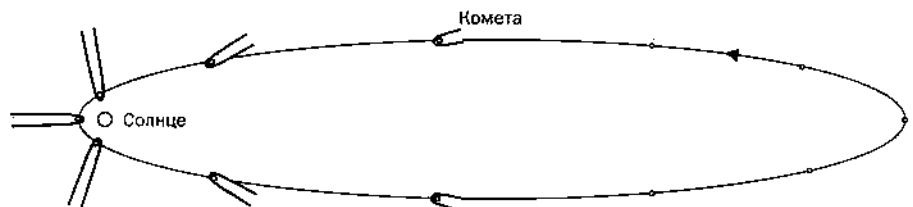
Солнечная система включает в себя множество объектов, которые слишком малы для того, чтобы называться планетами, однако хорошо различимы с Земли. А еще больше небесных тел вовсе не видны невооруженным глазом, пока их траектории не пересекут траекторию Земли, — они прилетают к нам в виде метеоров, или “падающих звезд”. Все эти объекты путешествуют вокруг Солнца по эллиптическим орбитам. Астероиды — это сравнительно небольшие космические тела, орбиты которых проходят между орбитами Марса и Юпитера, где они формируют пояс астероидов. Форма орбит астероидов очень близка к окружности, и иногда эти космические объекты относят к малым планетам (*minor planets*).

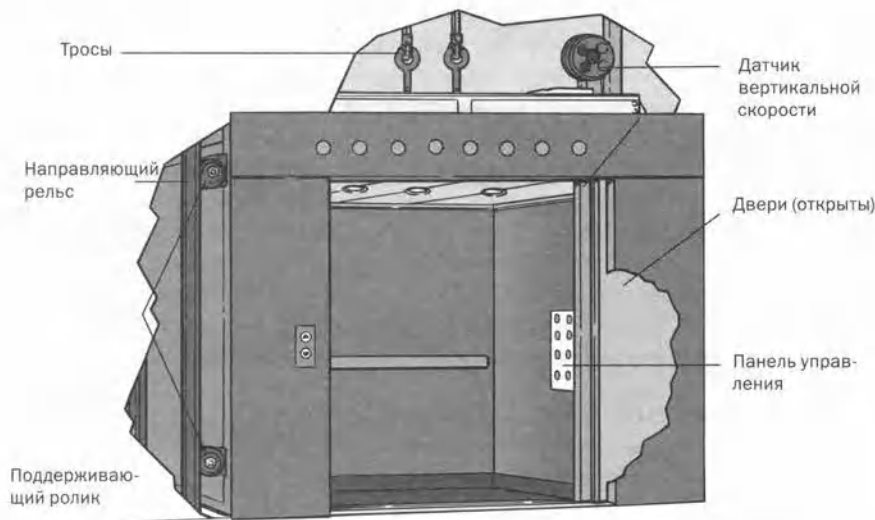
Кометы, напротив, огибают Солнце по сильно вытянутым эллиптическим орбитам. Они начинают свой путь очень далеко от Солнца и в единственной точке своей орбиты приближаются к нему. Когда комета подлетает близко к Солнцу, оно освещает комету, и мы видим ее благодаря тому, что испаряющийся с ее поверхности газ отражает солнечный свет. Орбита типичной кометы изображена на рис. 4.3.6.

Чтобы понять, как это происходит, давайте проследуем за кометой по орбите. Вначале комета находится далеко от Солнца; она движется медленно, и ее кинетическая энергия относительно низка. Маленькую комету невозможно увидеть даже в мощный телескоп. Однако удаленность от Солнца обеспечивает ей высокую потенциальную энергию, обусловленную тяготением. Ускорение кометы направлено к Солнцу, но ее тангенциальной скорости не хватает для того, чтобы ее орбита стала близка к окружности, как орбиты планет. Поэтому комета стремительно летит чуть ли не прямо на Солнце, наращивая скорость и кинетическую энергию за счет потенциальной энергии. По мере приближения кометы к Солнцу ее поверхность нагревают солнечные лучи, и из ядра кометы начинает испаряться газ. Исходящий от Солнца постоянный и равномерный поток частиц, так называемый солнечный ветер, сдувает газ с кометы и гонит его прочь — словно легкий шелковый шлейф развевается в токе воздуха от вентилятора. Этот газовый хвост освещается Солнцем, поэтому мы его и видим.

В ближайшую к Солнцу точку комета приходит с очень высокой скоростью. Она перевела большую часть своей потенциальной энергии в кинетическую, и теперь стремительно проносится мимо Солнца, и вновь улетает вдаль. Газ конденсируется на остывающем ядре кометы, и ее видно все хуже и хуже. Ее ускорение по-прежнему направлено к Солнцу, но на этот раз это ускорение уменьшает направленную прочь от Солнца скорость. Кинетическая энергия кометы переходит обратно в потенциальную. В конце концов комета возвращается на исходную позицию, и цикл повторяется.

Рис. 4.3.6. Комета движется вокруг Солнца по эксцентрической орбите по вытянутому эллипсу. На большом расстоянии от Солнца комета движется медленно, но по мере приближения к нему разгоняется. Ее хвост — это на самом деле газ, который испускают поверхностные ядра и который уносится от Солнца солнечным ветром.





## 4.4 Лифты

Изобретение стали сделало возможным строительство небоскребов, однако только с изобретением лифта это строительство получило практический смысл. Представьте себе жизнь без лифта: офисы на верхних этажах небоскреба Эмпайр-стейт-билдинг были бы доступны лишь немногим спортсменам мирового класса!

В основе лифта — весьма простой подъемный механизм. Существует всего несколько типов лифтов, и с 1853 года, когда американский инженер Элиша Грейвз Отис (1811–1861) изобрел безопасный лифт, в технологии подъема и опускания лифтовых кабин мало что изменилось. Изменились лишь источники энергии, да управляющие устройства стали более сложными и точными. Вместо пара сегодня используется электричество, а работу машинистов и лифтеров взяли на себя компьютеры.

### Винтовые лифты

Домкрат с винтовым механизмом — одно из самых старых и простых подъемных устройств. Домкраты широко применяются в промышленности, строительстве и вообще везде, где необходимо поднимать, удерживать и перемещать тяжелые предметы. С помощью домкрата выравнивают здания и подпирают провисающие балки, да и в ваш набор автомобильных инструментов наверняка входит домкрат. Неудивительно, что в первых лифтах также использовался винтовой механизм. Кабина лифта крепилась к верхней части такого механизма, и винт вращался в отверстии с резьбой, поднимая или опуская кабину. Хотя пассажирских лифтов с винтовым механизмом давно не существует, о них стоит немного поговорить.

Лифт с винтовым механизмом представляет собой подъемную платформу, которую толкает вверх расположенный под ней домкрат (рис. 4.4.1). В начале эры лифтов винтовой домкрат считался весьма подходящим устройством, потому что он давал заметный выигрыш в силе и делал почти невозможными аварии (с лифтами, которые поднимались с помощью троса, до 1853 года происходило немало несчастных случаев). Исход падения лифта мог быть ужасным, и мысль о том, что кабину подпирает снизу толстый металлический винт, успокаивала пассажиров.

Но все же главное достоинство винтовых домкратов, которые используются в конструкциях различных подъемников, — это возможность получить выигрыш в силе. За счет незначительного момента силы, приложенного к цилиндру с резьбой, можно поднимать огромные тяжести. Как мы уже говорили в 1-й главе, чтобы поднять на второй этаж рояль, надо так или иначе совершить большую работу. Тогда у нас был пандус, теперь — винтовой домкрат. На самом деле резьба винта представляет собой, в сущности, винтовой пандус, так что принцип действия тот же. С помощью винтового домкрата человек может поднимать рояль, совершая в каждый момент времени небольшую работу. Небольшой момент силы,

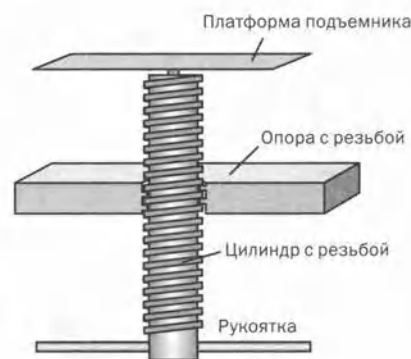


Рис. 4.4.1. Винтовой домкрат поднимает и опускает тяжести за счет перемещения цилиндра с резьбой — ходового винта — по резьбовому отверстию. К рукояткам винта приложен умеренный по величине момент силы, который заставляет винт вращаться и подниматься, а винт, в свою очередь, действует на закрепленную над ним платформу с большой силой.

который многократно прилагается с каждым оборотом винта, совершает точно такую же работу, что и при подъеме роля одним рывком на второй этаж.

Но хотя винт создает значительную подъемную силу, он должен вращаться очень быстро, чтобы платформа поднималась с приемлемой скоростью. К сожалению, при вращении винта неизбежно возникает трение скольжения, и при быстром вращении винт сильно нагревается и сильно изнашивается. Трение и износ существенно ограничивают вертикальную скорость лифта с винтовым механизмом, а если он будет ползти с одного этажа на другой в течение нескольких минут, пассажиры, скорее всего, предпочтут подняться по лестнице. Наконец, длина подъемного винта должна быть равна высоте здания, в котором работает лифт, а дома становились все выше и выше. Все эти недостатки привели к тому, что вместо винтовых механизмов давно уже используются гидравлические и тросовые.

## Жим снизу; гидравлический лифт

Гидравлический лифт поднимается при помощи длинного металлического стержня, в то время как лифт с канатным приводом висит на длинном металлическом тросе. Начнем с гидравлического лифта.

Каabinу такого лифта поднимает гидроцилиндр (рис. 4.4.2) — в этом устройстве плунжер (очень длинный поршень) под давлением рабочей жидкости ходит вверх-вниз внутри полого цилиндра. Рабочая жидкость — как правило, масло или вода — действует с определенной силой на некую поверхность, например на основание плунжера. Если давление рабочей жидкости достаточно велико, приложенная к основанию плунжера сила превышает вес плунжера с лифтом и сообщает им направленное вверх ускорение. Подробнее о поведении жидкостей, их давлении и основах гидравлики рассказывается на с. 158 в связи с законом Паскаля.

Но когда поршень поднимается, увеличивается объем, который способна занять рабочая жидкость, а ее давление падает. Чтобы плунжер продолжал подниматься дальше, необходимо постоянно подавать рабочую жидкость в цилиндр. Как правило, это делают с помощью электронасоса. Насос забирает из резервуара рабочую жидкость низкого давления и нагнетает ее в гидроцилиндр. Насос совершает работу над жидкостью, а эта работа обеспечивает перемещение лифта вверх.

Когда лифт оказывается на нужной высоте, насос прекращает работу и рабочая жидкость, которая находится под давлением, держит над собой плунжер. Если уровень жидкости в гидроцилиндре не меняется, поршень и кабина лифта остаются на месте, пока пассажиры входят и выходят.

Чтобы лифт мог опуститься, открывается клапан и находящаяся под давлением рабочая жидкость с ускорением устремляется в резервуар, в область низкого давления. Цилиндр опустошается, и кабина лифта опускается. Однако при спуске она высвобождает потенциальную энергию, и эта энергия должна куда-то направиться. В результате она вызывает завихрения потока рабочей жидкости, возвращающейся в резервуар, и быстро переходит в тепловую. Когда бурление в резервуаре стихает, выясняется, что рабочая жидкость стала теплее, чем была до начала движения лифта.

Кабина гидравлического лифта опирается на плунжер, словно на винт домкрата, поэтому гидравлический лифт вполне безопасен. Даже если цилиндр будет поврежден, рабочая жидкость вряд ли сможет вытечь из него настолько быстро, чтобы скорость спуска стала опасной для жизни пассажиров. При этом, в отличие от винтового домкрата, гидроподъемник меньше подвержен трению и износу, поэтому поршень может ходить внутри цилиндра довольно быстро. Скорость движения кабины гидравлического лифта непосредственно связана со скоростью подачи рабочей жидкости. Понятно, что насос должен за короткое время совершить большую работу над рабочей жидкостью, то есть он должен быть очень мощным. Тем не менее скорость гидравлического лифта ограничивается только мощностью насоса и соображениями комфорта пассажиров. Резкое ускорение мало кому доставляет удовольствие. Теоретически можно сконструировать такой лифт, который в один миг взлетит с этажа на этаж, но тогда пассажирам могут понадобиться ремни и подушки безопасности.

Гидравлические лифты отлично работают во многих случаях, однако у них есть по крайней мере два минуса. Во-первых, высота подъема ограничивается вы-



**Рис. 4.4.2.** Каabinу гидравлического лифта поднимает плунжер гидроцилиндра. Насос подает в полость цилиндра рабочую жидкость под высоким давлением, и плунжер поднимается. Когда клапан открывается и находящаяся под давлением рабочая жидкость перетекает обратно в резервуар, лифт спускается.



сотой гидроцилиндра и длиной плунжера. Если плунжер способен поднять лифт до верхнего этажа высокого здания, то при спуске на первый этаж он должен ровно на такую же высоту опускаться вниз, то есть рабочий цилиндр должен уходить глубоко ниже уровня земли. Понятно, что смонтировать гидроцилиндр в высоком здании — задача не из легких: надо бурить глубокую шахту и с помощью подъемного крана устанавливать там цилиндр. Трудности, возникающие при изготовлении цилиндра и плунжера, а также при монтаже готового гидроподъемника накладывают ограничения на его высоту. Оборудовать гидравлический лифт в 30-этажном здании чрезвычайно сложно. Существуют телескопические плунжеры, но даже если их колена задвигаются друг в друга, словно секции автомобильной радиоантенны (рис. 4.3.3), для самых высоких небоскребов они не годятся.

Другой недостаток гидравлических лифтов заключается в том, что в перерывах между двумя подъемами они не запасаются энергией. Энергия, потраченная на подъем пассажиров на тридцатый этаж, не запасается, пока они спускаются вниз: она переходит в тепловую энергию рабочей жидкости. В высоком здании интенсивно работающий лифт способен потратить изрядное количество электроэнергии на бесполезный нагрев рабочей жидкости.

## Тяга сверху; лифт с тросовым приводом

Большинство современных моделей лифтов поднимаются и опускаются с помощью троса, что избавляет строителей от необходимости прятать глубоко в землю длинные гидроцилиндры. Внедрение подвесных лифтов шло нелегко: люди опасались любых систем, которые могут рухнуть только из-за того, что лопнет поддерживающий их трос. Однако в 1853 году Отис продемонстрировал свой “безопасный лифт”, который в случае обрыва троса автоматическим останавливался. Среди дальнейших усовершенствований была и замена пеньковых канатов, использовавшихся в первых лифтах, металлическими тросами, которые не так быстро изнашивались со временем и крайне редко обрывались. Проблема безопасности была решена, и подвесные лифты стали самым распространенным типом подъемных кабин. Но чтобы понять, как работает лифт с тросовым приводом, мы сперва должны понять, как вообще поднимаются предметы на тросе и как блоки перераспределяют приложенные к нему силы. Давайте потратим немного времени на тросы с блоками.

Допустим, в вашем доме сломался лифт. Вы решили поднять пустую кабину вручную с помощью легкого, но прочного троса (рис. 4.4.4). Лифт стоит на нижнем этаже, а вы тянете его на тросе с пятого этажа, где находится ваша квартира. Пустая кабина весит 500 Н — как раз примерно столько вы и способны поднять. Если бы у вас была рука длиной в пять этажей, вы могли бы поднять лифт прямо рукой. Трос просто расширяет пределы ваших возможностей, так что вы можете приложить направленную вверх силу к лифту, который находится далеко внизу.

Когда вы тянете трос, по всей его длине возникает натяжение. Это означает, что каждый отрезок троса с определенной силой тянет к себе два соседних отрезка. Чтобы неподвижно держать на весу пустую кабину лифта,

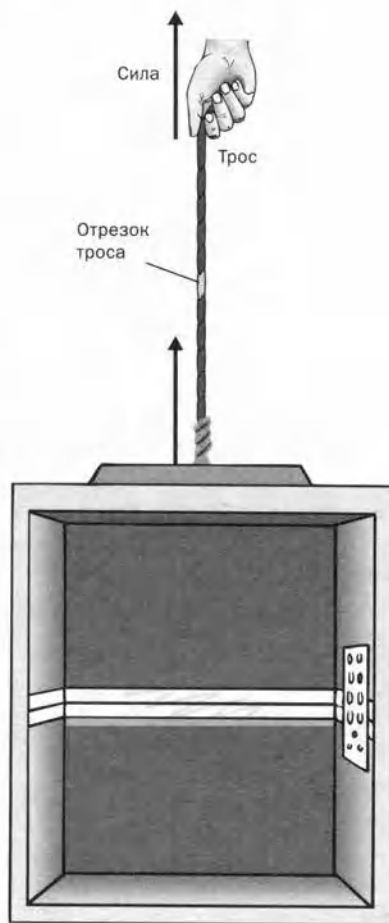
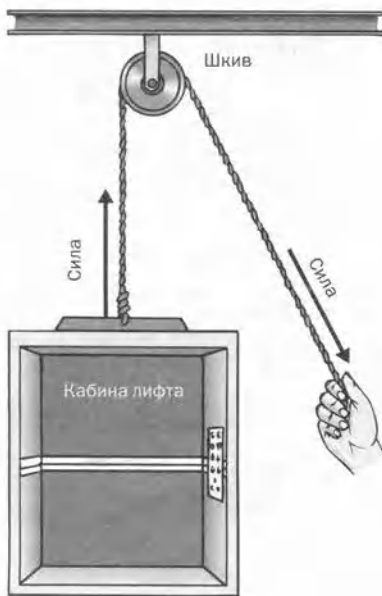
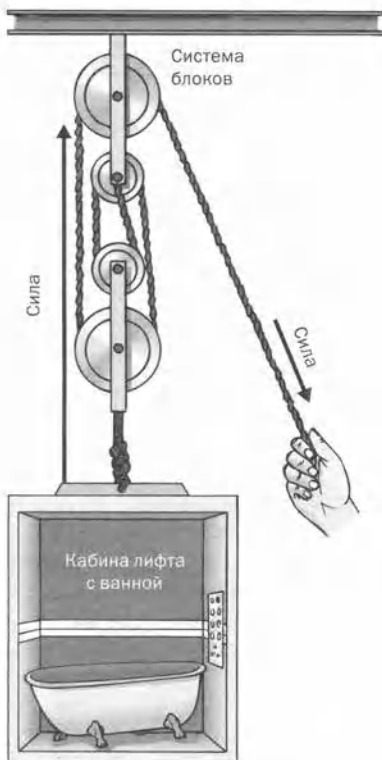


Рис. 4.4.3. Этот лифт поднимается на верхний этаж трехэтажного дома с помощью телескопического гидроподъемника. На самом деле в телескопической системе два плунжера — первый поднимается из подземной части цилиндра, а второй, меньшего диаметра, выдвигается вверх из первого. Если плунжеры выдвинуты полностью и расположены последовательно один над другим, высота, на которую поднимается лифт, почти вдвое больше высоты самого гидроцилиндра.

Рис. 4.4.4. Натягивая очень легкий неподвижный трос, вы передаете вдоль троса растягивающее усилие, равное силе, приложенной с вашей стороны к тросу. К каждому отрезку троса — например, к выделенному цветом среднему участку на рисунке — приложена направленная вверх сила со стороны соседнего отрезка сверху и направленная вниз сила со стороны нижнего отрезка.



**Рис. 4.4.5.** Перекинув трос через шкив, вы можете передать тросу тяговое усилие из другой точки. Вы прикладываете ту же силу, и тяговое усилие в тросе остается тем же, но шкив меняет направление вектора силы и облегчает вашу задачу.



вы должны тянуть трос вверх с силой 500 Н. При этом каждый отрезок троса действует на соседний снизу отрезок с направленной вверх силой, равной 500 Н, а на соседний сверху отрезок — с направленной вниз силой, равной 500 Н. Нижний конец троса действует с направленной вверх силой, равной 500 Н, на кабину лифта. Таким образом, приложенная с вашей стороны, направленная вверх сила в 500 Н метр за метром передается вдоль троса, пока не доходит до кабины. Именно так вам удастся приложить к лифту, находящемуся намного ниже вас, направленную вверх силу (мы условились, что трос просто позволяет вам дотянуться туда, куда рука не достает).

Поскольку вес лифта составляет 500 Н, а вы также действуете на него с силой 500 Н, направленной вверх, к лифту приложена нулевая результирующая сила, и ускорения он не имеет. Раз в начальный момент времени лифт покоился, он так и остается в покое. Но если вы теперь потянете трос с чуть большим усилием, на лифт начнет действовать ненулевая результирующая сила, и он получит ускорение, направленное в сторону пятого этажа. Как только он двинется вверх, вы можете снова снизить усилие до 500 Н, и лифт будет перемещаться вверх равномерно и прямолинейно. Вы совершаете работу над лифтом, потому что тянете его вверх на тросе, и он поднимается.

Для того чтобы поднять пустой лифт на пятый этаж, исполнинская сила не нужна, однако эту силу надо приложить непосредственно вдоль продольной оси шахты. Было бы, конечно, гораздо удобнее тянуть за трос, находясь не непосредственно над шахтой, а где-нибудь в стороне, — и вы подвешиваете над шахтой лифта блок (рис. 4.4.5). Перекинув трос через блок, вы можете создать напряжение на тросе, находясь не над шахтой, а в другой точке. В сущности, теперь вы можете тянуть трос даже вертикально вниз: хотя каждый отрезок троса тянет на себя соседний, по мере того как трос движется вокруг блока, направление силы постепенно меняется. В результате блок меняет направление силы так, что ее вектор, на одном конце троса обращенный вниз, на другом конце направлен вверх. Такое перераспределение сильно упрощает подъем лифта и даже позволяет вам использовать вес каких-нибудь предметов для облегчения подъема (см. 1).

## Система блоков

Впрочем, лифт не всегда остается пустым. На прошлой неделе у вас треснула ванна, и вы с помощью друзей вытащили ее на пожарную лестницу и столкнули вниз. Это было не так уж трудно (хотя симпатичная клумба около дома теперь полностью уничтожена). Однако новая ванна весит 1300 Н — как же втащить ее в квартиру? Придется воспользоваться лифтом. Можно опять установить блок и призвать друзей вместе тянуть трос. Но гораздо разумнее собрать систему блоков — так называемый полиспаст. Натягивая трос, вы передаете натяжение по всей его длине. Если использовать одно и то же натяжение несколько раз подряд, можно получить выигрыш в силе. Именно это и происходит при использовании системы блоков.

В полиспасте трос движется туда и обратно между подвижной и неподвижной группами блоков (рис. 4.4.6). Дальний от вас конец троса неподвижно закреплен на одной из групп. Необходимо, чтобы трос ходил по блокам свободно. Теперь, если натянуть трос, натяжение в одной и той же мере передастся каждому участку троса между группами блоков. Если приложить к концу троса силу 500 Н, на каждом его отрезке возникнет тяговое усилие, равное 500 Н. В результате обе группы блоков будут притягиваться друг к другу, причем на каждом отрезке троса сила будет равна 500 Н. Если между крышей кабины лифта и пятым этажом помещаются, например, 4 участка троса, величина суммарной

**Рис. 4.4.6.** Лифт с ванной поднимается с помощью системы блоков. Поскольку трос делится на четыре участка между лифтом и верхним блоком, натяжение, которое тянет трос вверх, приложено четыре раза, и направленная вверх результирующая сила равна четырехкратному тяговому усилию, действующему вдоль троса.

силы, которая поднимает кабину с ванной, составит 2000 Н. Поскольку кабина вместе с ванной весит всего 1800 Н, результирующая сила будет направлена вверх, и ускорение лифта также будет направлено вверх.

Однако, хотя система блоков позволяет поднять тяжело нагруженный лифт с относительно малым (по сравнению

с использованием одного блока) усилием, за все приходится платить. Чтобы поднять лифт на 1 м, надо каждый участок троса укоротить до 1 м. Раз таких участков 4, вы должны протянуть по системе блоков 4 м троса. Вы выигрываете в силе, если прикладываете малую силу на длинном отрезке, а на коротком отрезке получаете большую силу. Независимо от количества задействованных блоков работа по перемещению лифта с ванной внутри на ваш этаж будет всегда одинаковой. Система блоков просто позволяет вам совершить эту работу поэтапно и приложить меньшую силу на большом расстоянии.

## Лифты с тросовым приводом и противовесы

Настоящий лифт с тросовым приводом напоминает только что изученный нами лифт, которым вы управляли с помощью собственных рук. Конечно, в настоящем лифте трос тянет какая-нибудь машина. В ранних моделях трос натягивался с помощью гидроцилиндра, который приводился в действие паром. Под давлением пара рабочая жидкость подавалась в гидроцилиндр и выводилась обратно, а ходивший взад и вперед плунжер тянул тросы. Как правило, гидроцилиндр размещали между двумя частями системы блоков. Из системы блоков трос шел к одиночному блоку, закрепленному вверху шахты, и далее к крыше кабины лифта. Когда плунжер раздвигал две части системы блоков, трос натягивался и поднимал лифт. Когда рабочую жидкость выпускали из гидроцилиндра, плунжер шел назад, блоки в системе сближались и лифт спускался.

Важным усовершенствованием тросового лифта стал противовес (рис. 4.4.7). Чтобы поднять кабину лифта, надо совершить большую работу, потому что при подъеме возрастает потенциальная энергия кабины. Неплохо было бы на спуске вернуть эту энергию. Перевести потенциальную энергию обратно в пар высокого давления трудно, зато ее легко использовать ее для подъема противовеса.

Когда лифт едет вверх, противовес опускается, а когда лифт едет вниз — поднимается. Поскольку вес кабины и противовеса одинаков, суммарный вес, который вы поднимаете или опускаете при движении лифта, почти равен нулю. Общая потенциальная энергия лифта меняется несущественно — она просто переходит от одной части механизма к другой. Лифт уравнивается противовесом, поэтому на движение не требуется много энергии. Лифт с противовесом ведут себя как качели, которые достаточно слегка подтолкнуть, чтобы привести в движение.

Обычно противовес подвешен на том же тросе, что и лифт. От противовеса трос проходит вверх, перекидывается через блок наверху шахты, затем спускается вниз и крепится к крыше кабины. Вес противовеса, как правило, равен весу пустой кабины плюс примерно 40% номинальной грузоподъемности лифта. Таким образом, если лифт нагружен на 40%, противовес полностью уравнивает кабину и для подъема или спуска требуется совершить лишь небольшую работу.

Большинство современных лифтов приводятся в действие электромотором. Электромотор имеет ряд преимуществ — регулируемую скорость вращения, высокий крутящий момент и надежность. В разделе 11.3 мы будем изучать электромоторы более подробно, а сейчас для нас важно то, что они служат хорошими источниками механической энергии при различных частотах вращения, крутящих моментах и при разной мощности. Мощность электромотора обычно измеряется в лошадиных силах, и мощность электромоторов, которые используются для лифтов, может достигать нескольких сотен лошадиных сил.

Однако первые модели электромоторов не отличались высокой мощностью, поэтому они поднимали лифт с помощью лебедки. Трос, шедший от кабины, наматывался на барабан лебедки, расположенный наверху шахты. Противовес висел на другом тросе, который также наматывался на этот же барабан. Тросы были намотаны так, чтобы когда трос противовеса разматывался, трос лифта наматывался (и наоборот). Электромотор вращал барабан с помощью передаточного механизма.

У тросового барабана было несколько недостатков. Он поднимал и опускал кабину относительно медленно, потому что максимальная угловая скорость барабана была ограничена передаточным механизмом. Когда лифт поднимался на верхний этаж, на барабане должен был поместиться полностью весь намотанный трос, что ограничивало длину (и массу) троса, а значит, и высоту шахты. Диаметр

❶ В связи с разработкой безопасных лифтов интерес публики к высотным зданиям резко возрос. Верхние этажи вдруг стали более востребованы, чем нижние. Особое значение стали придавать скорости. В 1873 году в Нью-Йорке, в здании компании *Western Union* прошли испытания лифта с водяным противовесом. Кабина поднималась за счет веса огромного бака с водой. Чтобы опустить лифт, надо было слить воду. Этот лифт не завоевал популярности, так как удерживался только стопорным устройством и не имел автоматической системы безопасности, что отпугивало пассажиров.



Рис. 4.4.7. Кабина и противовес лифта с тросовым приводом крепятся к противоположным концам троса. Электромотор приводит в действие желобчатый шкив, в результате чего кабина поднимается или опускается. Противовес движется в обратную сторону и тем самым помогает электромотору поднимать лифт, а во время спуска кабины запасает энергию.



**Рис. 4.4.8.** Три кабины тросового лифта поднимаются и опускаются в прозрачной шахте, все движущиеся части хорошо видны. Каждая кабина подвешена на четырех металлических тросах, которые уходят в надстройку на крыше здания, где находится большая часть механизмов.

барабана рассчитывался так, чтобы крутящий момент не был большим, и длина троса в подобной системе не могла превышать примерно 100 м.

В современных лифтах трос не наматывается на барабан, а прокручивается по нему с помощью тягового усилия (**рис. 4.4.8**). Трос проходит вверх от кабины, перекидывается через тяговый барабан и спускается в шахту лифта, где крепится к противовесу. Барабан приводится в действие с помощью электромотора. Если скорость подъема не имеет решающего значения, достаточно небольшого мотора с передаточным механизмом. Однако в высоких зданиях барабан обычно вращается с помощью установленного непосредственно на его оси мощного электромотора. Скорость такого лифта может достигать 10 м/с.

Мощность, которая потребуется от электромотора, зависит от того, насколько хорошо уравновешены лифт и противовес. Легче всего мотору опустить и поднять кабину, если лифт загружен на 40% допустимой нагрузки и оба веса равны. Если кабина пуста или, наоборот, перегружена, для подъема более тяжелой части системы мотор должен обеспечить достаточную мощность, а для поглощения энергии, которая высвобождается при быстром спуске более тяжелой части, потребуются тормоза. Максимальная нагрузка и скорость движения лифта зависят и от максимальной механической мощности электромотора, и от прочности тросов.

В конструкции грузовых лифтов часто используется система блоков, так что никакому отрезку троса не приходится нести вес всей грузовой платформы целиком. Даже когда используется только один блок, лифт поддерживают сразу несколько тросов — и ради безопасности, и ради меньшего растягивания тросов. Растяжение троса — серьезная проблема в высотных зданиях. Трос, как любое другое тело, под действием натяжения ведет себя как пружина — его длина увеличивается пропорционально тяговому усилию. Когда в лифт входят пассажиры и общий вес лифта увеличивается, возрастает сила, действующая на несущий трос, и он слегка растягивается. Современные лифты снабжены системами выравнивания, которые автоматически подворачивают тяговый барабан в зависимости от растяжения троса. Пассажиры, входя в лифт и выходя из него, даже не подозревают, что где-то наверху происходит какая-то регулировка. Тем не менее, подпрыгнув в лифте, можно иногда почувствовать, как растягивается трос.

## Равновесие

Пол кабины лифта должен оставаться строго горизонтальным независимо от того, как распределятся по кабине пассажиры. Чтобы кабина не болталась в шахте, все без исключения современные лифты имеют направляющие рельсы. Плунжер гидравлического лифта способен удержать кабину в правильном положении, однако на него действуют моменты сил, возникающие при перемещении пассажиров по кабине, и это рано или поздно выведет плунжер из строя. Но тросовый лифт не имеет подобной системы выравнивания, так что направляющий рельс — единственный способ сохранить постоянную ориентацию кабины.

Чтобы понять, почему лифт с канатным приводом не может работать без направляющего рельса, попробуйте представить себе, что произойдет, если пассажир начнет расхаживать по кабине. Трос держит крышу кабины, и центр тяжести лифта — точка, в которой сосредоточен вес всей системы, — расположена близко к полу кабины прямо под местом крепления троса (**рис. 4.4.9, а**). Ускорение лифта, как и любого другого тела, направлено в сторону скорейшего уменьшения общей потенциальной энергии. Если бы центр тяжести кабины при ее покачивании оказался ниже и уменьшилась бы потенциальная энергия, ускорение кабины было бы направлено в направлении раскачивания.

Если расставить пассажиров равномерно вокруг центра пола, кабина будет висеть ровно. Но если они сгрудятся у одной стены, этот край пола опустится и кабина накренится (**рис. 4.4.9, б**). Хуже того, она начнет раскачиваться, словно маятник, пока не придет в состояние равновесия с соответствующим наклоном. Чтобы воспрепятствовать такому раскачиванию, проще всего зафиксировать кабину на направляющем рельсе. Он создает момент силы, необходимый для выравнивания кабины.

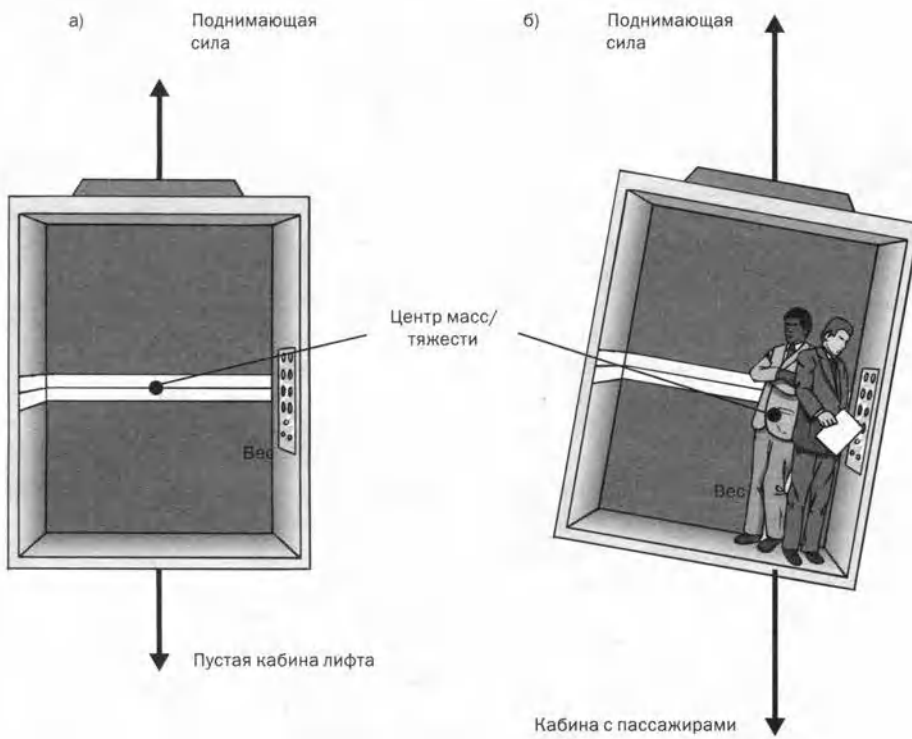


Рис. 4.4.9. (а) Пустая кабина висит ровно, потому что ее центр тяжести находится посередине, прямо под удерживающим ее тросом. (б) Кабина с пассажирами наклонилась, потому что центр тяжести находится не в середине. Кабина принимает такое положение, чтобы центр тяжести вновь оказался прямо под тросом, однако теперь это положение будет наклонным. Для того чтобы кабина сохраняла правильное положение при перемещении пассажиров, она должна двигаться по направляющему рельсу, который создает выравнивающие моменты сил.

## Безопасность

Любой подвесной лифт снабжен защитным устройством, которое не даст ему упасть в случае обрыва троса. Как правило, у современных лифтов несколько дублирующих тросов, но все же необходимо иметь какой-то механизм для защиты от возможных аварий ②.

В свое время Элиша Отис разработал для своих первых лифтов так называемый “ловитель” — устройство с колодками, которые прижимались к направляющему рельсу, если ослабевало натяжение несущего троса. Если трос рвался и натяжение пропадало, мощная пружина с силой прижимала колодки к рельсу.

В наше время ловителями управляют датчики вертикальной скорости лифта. Как только скорость превысит установленное допустимое значение, ловители захватывают рельс, тормозя кабину. Подобный контроль позволяет удержать пустую кабину от стремительного взлета ввысь, а тяжело нагруженную — от падения.

Один из вариантов такого датчика — центробежный ограничитель скорости, устройство, реагирующее на скорость вращения стержня (рис. 4.4.10). Стержень, установленный на лифте, поворачивается с помощью блока и отдельного троса, прикрепленного к кабине. Чем быстрее движется лифт, тем быстрее вращается стержень. Центробежный ограничитель скорости раскручивает по кругу несколько грузов. Грузы совершают равномерное круговое движение, поэтому некая центростремительная сила должна сообщать им центростремительное ускорение. В ограничителе такая сила создается еще несколькими стержнями, разделенными пружиной.

Пока основной стержень вращается медленно, пружина не дает тонким стержням сближаться. Но как только основной стержень начнет вращаться

② Единственный случай падения лифта, снабженного системой безопасности, имел место в 1945 году, когда в небоскреб Эмпайр-стейт-билдинг врезался заблудившийся в тумане бомбардировщик. Фрагменты самолета пробили шахту лифта на 79-м этаже и оборвали тросы. Кабина, находившаяся на 75-м этаже, рухнула вниз, но возрастающее по мере падения сопротивление воздуха, куча обрывков троса и предохранительный буфер на дне шахты смягчили удар. В лифте находилась только 20-летняя лифтерша — она обошлась без серьезных травм.

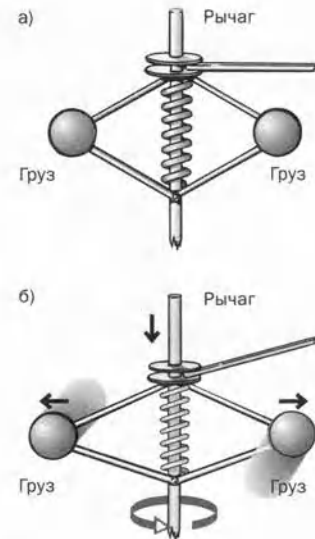


Рис. 4.4.10. В центробежном ограничителе скорости используется правило, согласно которому тело совершает круговое движение под действием центростремительной силы. Пока основной стержень покоится или вращается медленно (а), пружина не позволяет верхним и нижним тонким стержням сближаться. Когда основной стержень начинает вращаться слишком быстро, грузы смещаются от центра (б) и рычаг поднимается.

быстрее, центростремительная сила возрастет, и тонкие стержни начинают сжимать пружину. Смещаясь, стержни давят на рычаг. Если такой рычаг установлен на лифте, он приводит в действие тормоза, которые замедляют спуск кабины.

## Старт и стоп

---

Просто подниматься и опускаться для лифта совершенно недостаточно. Чтобы лифтом можно было пользоваться, он должен уметь останавливаться на нужном этаже, выпускать и впускать пассажиров и грузы, а затем вновь ехать на другой этаж. Чтобы пассажиры чувствовали себя комфортно в лифте и не валялись на пол и друг на друга, лифт должен плавно трогаться с места и так же плавно останавливаться. Удовлетворить всем этим требованиям к работе лифта помогает электромотор с переменной скоростью вращения.

Независимо от того, управляется лифт с помощью лифтера или автоматически, крутящий момент на тяговом барабане необходимо строго контролировать для предотвращения несчастных случаев. В момент начала подъема лифта и в момент его остановки при спуске его ускорение направлено вверх, и вы, находясь в кабине, чувствуете, что ваш вес увеличился. Но если ускорение чересчур велико, вас может просто бросить на пол кабины. В начале спуска и в момент остановки после подъема ускорение лифта направлено вниз, и вы ощущаете легкость. Но если направленное вниз ускорение будет слишком велико, вас может подбросить вверх и вы врежетесь головой в потолок кабины. Лишь после того как скорость лифта станет постоянной — неважно, направлена она вверх или вниз, — ваш кажущийся вес сравняется с действительным.

Правильно сконструированный лифт ускоряет и замедляет ход постепенно. Для того чтобы обеспечить плавное торможение, лифтер или автомат должны производить определенные расчеты и начинать снижение скорости за некоторое время до предстоящей остановки. В прежние годы, когда не было автоматических систем, способных рассчитать время и расстояние до остановки, для этого требовалось большое умение. В лифтах с ручным управлением, где кабину останавливал лифтер, максимальная скорость была ограничена именно для того, чтобы человек успел рассчитать режим торможения. В современных лифтах для этих расчетов используются автоматические системы, и такие лифты способны подниматься и опускаться очень быстро и при этом останавливаться и трогаться с места в комфортном режиме.

---

## ГЛАВА 5

# ТЕКУЧИЕ СРЕДЫ — ЖИДКОСТИ И ГАЗЫ

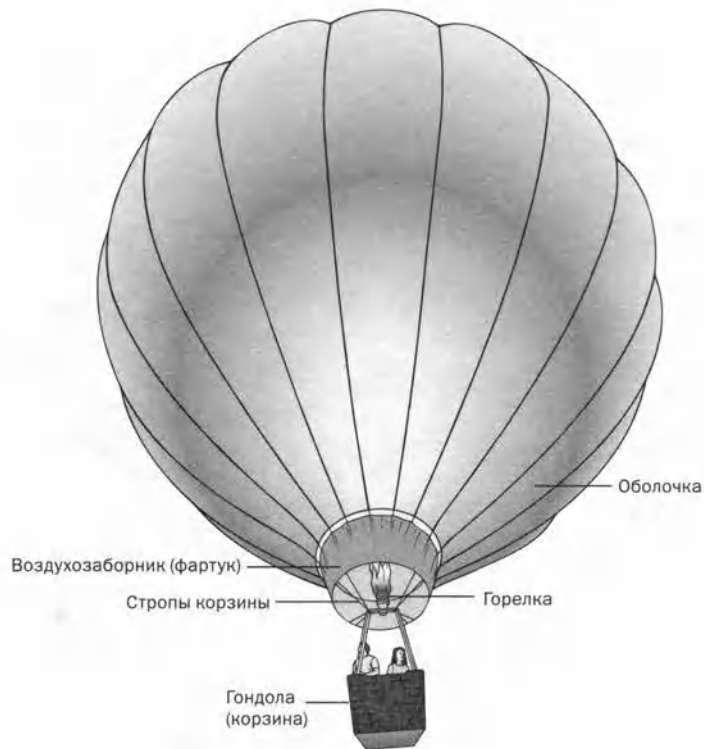
**Д**о сих пор предметом нашего изучения были твердые тела. Но газы и жидкости тоже представляют собой важную часть окружающего нас мира — это и воздух, которым мы дышим, и вода, в которой мы плаваем, и даже кровь, которую наши сердца гонят по жилам. Поэтому сейчас мы займемся объектами, не имеющими строго определенной формы, в чем и состоит их главное отличие от твердых тел. Эти объекты — жидкости и газы — называются текучими средами, или, для краткости, флюидами.

Обычно в курсе физики тему флюидов практически обходят стороной. Можно подумать, что никому не хочется брать на себя ответственность за их поведение. По большей части преподаватели рассказывают о нескольких основных характеристиках жидкостей и газов, таких как текучесть и давление, а затем переходят к другим темам. Вы практически слышите, как они говорят: «Не обращайте внимания на этого слона, что сидит в углу».

Это поверхностное отношение к флюидам достойно сожаления, ибо оно лишает нас знаний о процессах, которые делают эти объекты такими полезными в повседневной жизни и которые описываются глаголами: «плавать», «купаться», «летать», «брызгать», «дышать», «завихряться», «качать», «взбалтывать», «наливать» и «пить». Не будь на свете жидкостей и газов, ваша жизнь была бы невероятно скучна (даже если вы не завсегдатай кафе и баров). Как вы, возможно, заметите, читая эту и следующую главы, я очарован текучими средами, считаю их удивительными и всегда радуюсь, если узнаю о них что-то новое. Только подумайте, сколькими способами влияют на нашу жизнь воздух и вода, и у вас тоже не останется сомнений в том, что разобраться в поведении флюидов чрезвычайно полезно.

Хотя изучение поведения и движения жидкостей редко оказывается в центре внимания обычных людей, на самом деле это обширная область, включающая и фундаментальные, и прикладные аспекты. Динамика жидкостей — ее часто называют гидродинамикой — одинаково важна и для инженера-нефтяника, и для астрофизика, и для специалиста по физиологии животных. Инструменты для изучения текучих сред несколько сложнее инструментов для изучения твердых тел, потому что и сами эти среды сложнее: к ним трудно непосредственно приложить силу, а если это и удастся, они обычно движутся не как единый твердый объект. В этой главе мы рассмотрим отдельные понятия и инструменты, помогающие понять сложное поведение флюидов.

- 144 5.1 **Воздушные шары**  
*Почему воздушные шары летают*
- 156 5.2 **Водопровод**  
*Как насосы и трубы доставляют воду в наши дома*



## 5.1 Воздушные шары

Благодаря земному притяжению каждое тело вблизи поверхности Земли имеет вес, пропорциональный его массе, поэтому, если вы роняете предмет, он падает. Почему же тогда наполненный гелием воздушный шар — который, в конце концов, всего лишь одно из тел с массой и весом — взмывает в небо, когда вы его отпускаете? Неужели шар имеет отрицательную массу и отрицательный вес — или мы чего-то не учли?

Мы не учли воздух — в частности, слой воздуха над земной поверхностью, который удерживается над этой поверхностью силой тяжести. Поскольку воздух невидим и проницаем, мы часто забываем о его существовании. Но воздух иногда дает о себе знать. Вы ощущаете его силу, когда едете на велосипеде, а когда надуваете мяч или шарик, вы видите, как воздух заполняет объем шара. И когда вы отпускаете с привязи наполненный гелием воздушный шар, воздух поднимает его ввысь.

### Воздух и давление воздуха

Наполненные горячим воздухом или гелием шары поддерживаются окружающим их воздухом. Хотя шар имеет положительную массу и направленный вниз вес, окружающий воздух толкает шар вверх с силой, достаточной для того, чтобы уравнять его вес, так что шар может парить. Чтобы понять, что такое воздушные шары, мы должны начать с воздуха.

Как и все тела, которые мы успели изучить, воздух имеет массу и вес. Однако в отличие от других тел он не имеет фиксированной формы или размера. Одному килограмму воздуха можно придать любую форму, и он может занимать практически любой объем. Воздух сжимаем — это означает, что определенную массу воздуха можно сжать практически до любого объема. Например, один килограмм воздуха можно уместить в баллон для акваланга, а можно равномерно заполнить им баскетбольный зал.

Такая гибкость связана с микроскопической структурой воздуха. Воздух — это газ, то есть субстанция, состоящая из отдельных мелких частиц, движущихся независимо друг от друга, — атомов и молекул. Атом является наименьшей частицей химического элемента, сохраняющей его химические свойства. Молеку-



лы состоят из двух и более атомов и представляют собой мельчайшую частицу химического вещества, обладающую всеми его свойствами. Атомы в молекулах удерживаются вместе при помощи химических связей, образующихся благодаря взаимодействию электромагнитных сил между атомами.

Размер частиц воздуха чрезвычайно мал, меньше миллионной доли миллиметра в диаметре. Большую часть частиц составляют молекулы азота и кислорода, кроме того, имеется углекислый газ, вода, метан, водород, а также атомы инертных газов — аргона, неона, гелия, криптона и ксенона. Последние получили название инертных из-за своей химической пассивности — они не образуют прочных химических связей и редко входят в состав молекул.

Подобно крошечным шарикам, частицы воздуха имеют размер, массу и вес. Но если множество маленьких шариков подбросить в воздух, они быстро упадут на землю, частицы же воздуха, похоже, вообще не падают. Почему же они не осаждаются на землю?

Причина в тепловой энергии воздуха, в частности в той ее части, которая связана с движением частиц воздуха. Эта внутренняя кинетическая энергия заставляет мельчайшие частицы воздуха двигаться, вращаться и не дает им упасть. “Настоящие” шарики (например, стеклянные), напротив, слишком массивны и тяжелы, чтобы совершать заметные перемещения за счет тепловой энергии. Внутренняя кинетическая энергия воздуха, приходящаяся на одну частицу, соответствует его температуре; чем выше эта удельная энергия, тем теплее воздух. Некоторая часть тепловой энергии воздуха хранится в силах, действующих между частицами, однако эта внутренняя потенциальная энергия ничтожно мала, поскольку и силы взаимодействия между частицами воздуха очень слабы.

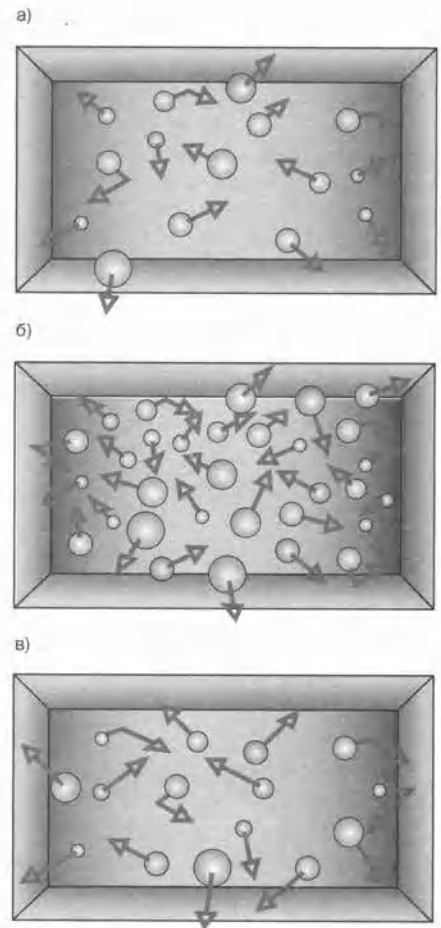
При ближайшем рассмотрении воздух представляет собой бесчисленные отдельные частицы, находящиеся в состоянии хаотического теплового движения (рис. 5.1.1, а). При комнатной температуре скорость частиц близка к скорости пули — примерно 500 м/с (1800 км/ч), но они сталкиваются так часто, что почти не перемещаются в том или ином направлении. Между столкновениями частицы воздуха движутся по прямолинейным отрезкам, так как силам гравитации не хватает времени, чтобы увлечь их вниз.

Давайте на минуту забудем о гравитации и рассмотрим, что происходит в сосуде, содержащем 1 кг воздуха. Внутри сосуда хаотично движутся частицы, и каждый раз, когда частица воздуха сталкивается со стенкой сосуда, она прикладывает силу к этой стенке. Хотя каждая из этих сил по отдельности крайне незначительна, число частиц настолько огромно, что вместе они создают значительную среднюю силу. Величина этой равнодействующей силы зависит от площади поверхности стенок; чем больше площадь, тем больше действующая на нее сила. Но чтобы описать это свойство воздуха, нам даже не нужно знать площадь поверхности, вместо этого мы можем использовать значение средней силы, с которой воздух действует на единицу площади поверхности. Эта величина называется давлением.

Поскольку давление есть сила, действующая на единицу площади, то и измеряется оно в единицах силы на площадь. В системе СИ единицей площади является квадратный метр (сокращенно м<sup>2</sup>), единицей давления является ньютон на квадратный метр, которую также называют паскаль (сокращенно Па) в честь французского математика и физика Блеза Паскаля. Один паскаль — это очень небольшое давление. Для сравнения: давление атмосферного воздуха составляет около 100 000 Па, то есть на один квадратный метр действует сила примерно в 100 000 Н. Поскольку 100 000 Н — это примерно вес городского автобуса, понятно, что воздух может с огромной силой давить на большие поверхности.

Помимо давления на стенки нашего воображаемого сосуда, воздух также давит на любое погруженное в него тело. Частицы отскакивают от поверхности тела, толкая эту поверхность внутрь тела. Пока тело может выдерживать эти сжимающие усилия, воздух не будет очень сильно на него влиять: поскольку давление воздуха равномерно во всех направлениях, силы, действующие на тело со всех сторон, в точности уравновешивают друг друга. Например, на лист бумаги действует нулевая результирующая сила, потому что силы, действующие на него с двух сторон, в сумме дают ноль.

Частицы воздуха отскакивают также друг от друга, то есть давление воздуха оказывает воздействие и на сам воздух. Определенный объем воздуха, помещенный в сосуд, испытывает действие таких же сжимающих сил, которые испыты-



**Рис. 5.1.1.** (а) Отскакивая от поверхности, частицы воздуха оказывают давление на эту поверхность; величина давления зависит от температуры воздуха и от того, насколько плотно упакованы его частицы. (б) Чем плотнее упаковка частиц воздуха, тем больше частиц каждую секунду сталкивается с поверхностью. (в) При повышении температуры воздуха увеличивается скорость частиц (показана стрелками), так что возрастает и сила, и частота их столкновений с поверхностью. В обоих случаях при повышении как скорости, так и частоты давление воздуха увеличивается.

вал бы металлический куб аналогичного объема. Воздух вокруг объекта давит на него, а объект, в свою очередь, давит на окружающий воздух. Поскольку результирующая сила, действующая на данный объем воздуха, равна нулю, то этот объем воздуха не ускоряется.

## Давление, плотность и температура

Поскольку давление воздуха создается благодаря колебаниям частиц, оно определяется тем, насколько часто и с какой силой частицы ударяются об определенный участок поверхности. Чем чаще или чем сильнее столкновения, тем выше давление воздуха.

Чтобы увеличить частоту столкновений, нужно более плотно упаковать частицы воздуха. Если в свой воображаемый сосуд мы добавим еще один килограмм воздуха, то количество частиц в том же самом объеме удвоится, соответственно удвоится и частота столкновений со стенками, и, следовательно, давление также увеличится в два раза (рис. 5.1.1, б). Таким образом, давление воздуха пропорционально плотности, то есть массе на единицу объема. Поскольку в системе СИ единицей объема является кубический метр ( $\text{м}^3$ ), то единица плотности — килограмм на кубический метр ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ). Окружающий нас воздух имеет плотность около  $1,25 \text{ кг}/\text{м}^3$ , в то время как плотность воды, например, значительно больше — около  $1000 \text{ кг}/\text{м}^3$ .

Можно также увеличить частоту ударений частиц о поверхность, увеличивая скорость их движения (рис. 5.1.1, в). Если удваивается внутренняя кинетическая энергия воздуха в нашем сосуде, это значит, что удваивается средняя кинетическая энергия каждой частицы. Поскольку кинетическая энергия частицы пропорциональна квадрату ее скорости, удвоение кинетической энергии приводит к увеличению скорости в  $\sqrt{2}$  раза. В результате каждая частица ударяется о поверхность в  $\sqrt{2}$  раза чаще и при этом действует на поверхность с силой, которая в  $\sqrt{2}$  раза больше средней силы\*. Если каждая частица действует на поверхность с силой в  $\sqrt{2} \times \sqrt{2} = 2$ , то есть в два раза больше средней силы, то и давление увеличивается в два раза. Таким образом, давление воздуха пропорционально средней кинетической энергии его частиц, точнее, значению их средней внутренней кинетической энергии.

Эта величина средней кинетической энергии, приходящейся на одну частицу, зависит от температуры воздуха: чем теплее воздух, тем больше средняя кинетическая энергия, приходящаяся на одну частицу, и тем выше давление воздуха. Но сопоставлять температуру воздуха с давлением, пользуясь общепринятыми шкалами Цельсия или Фаренгейта, не совсем удобно. Гораздо лучше для этого подходит шкала абсолютной температуры. В системе СИ такой шкалой является шкала Кельвина ( $\text{K}$ ). Когда температура воздуха равна  $0 \text{ K}$  ( $-273,15 \text{ }^\circ\text{C}$  или  $-459,67 \text{ }^\circ\text{F}$ ), внутренняя кинетическая энергия равна нулю и воздух не имеет давления; эта температура называется абсолютным нулем. Шкала Кельвина идентична шкале Цельсия, однако сдвинута так, что  $0 \text{ K}$  равен  $-273,15 \text{ }^\circ\text{C}$ . Кроме того, в шкале Кельвина отсутствуют отрицательные температуры. Температура в помещении ( $20 \text{ }^\circ\text{C}$  или  $68 \text{ }^\circ\text{F}$ ) составляет примерно  $293 \text{ K}$ .

Учитывая, что давление воздуха пропорционально как его плотности, так и абсолютной температуре, можно выразить взаимосвязь между этими величинами следующим образом:

$$\text{давление} \propto \text{плотность} \times \text{абсолютная температура} \quad (5.1.1)$$

Символ  $\propto$  обозначает пропорциональность, а не равенство, и хотя я буду называть приведенное выше выражение “уравнение 5.1.1”, на самом деле это не уравнение. При помощи этого выражения мы можем предсказывать, что произойдет, если мы изменим температуру или плотность конкретного газа или смеси газов, например воздуха. Однако выражение это имеет и свои ограничения: в частности, оно не работает, если сравнивать давление двух различных газов, скажем воздуха и гелия, которые отличаются химическим составом. Чтобы провести такое сравнение, уравнение 5.1.1 нужно доработать. Мы займемся этим позже, когда будем рассматривать шары, наполненные гелием.

Впрочем, даже для описания конкретного газа уравнение 5.1.1 не вполне корректно. Основная проблема заключается в том, что в действительности частицы

\* Средняя сила увеличится в  $\sqrt{2}$  раз потому, что средний импульс молекулы тоже увеличится в  $\sqrt{2}$  раз при увеличении средней скорости в  $\sqrt{2}$  раз. Сила же равна скорости изменения импульса.

газа не полностью независимы друг от друга. Если температура падает слишком низко, частицы начинают соединяться, образуя жидкость, и уравнение 5.1.1 становится недействительным. Но несмотря на некоторые ограничения, это простое соотношение давления, плотности и температуры поможет нам ответить на вопрос, почему летают воздушные шары, наполненные горячим воздухом; понять принципы строения земной атмосферы; узнать, откуда берется подъемная сила, которая поддерживает воздушный шар в воздухе, и почему горячий воздух поднимается вверх.

Величина	Единицы СИ	Английские единицы	СИ > английские единицы	Английские единицы > СИ
Площадь	кв. метр (м <sup>2</sup> )	кв. фут (фут <sup>2</sup> )	1 м <sup>2</sup> = 10,764 фут <sup>2</sup>	1 фут <sup>2</sup> = 0,092903 м <sup>2</sup>
Объем	кубический метр (м <sup>3</sup> )	куб. фут (фут <sup>3</sup> )	1 м <sup>3</sup> = 35,315 фут <sup>3</sup>	1 фут <sup>3</sup> = 0,028317 м <sup>3</sup>
Давление	паскаль (Па)	фунт-сила/фут <sup>2</sup>	1 Па = 0,020885 фунт-сила/фут <sup>2</sup>	1 фунт-сила/фут <sup>2</sup> = 47,880 Па
Плотность	килограмм на кубический метр (кг/м <sup>3</sup> )	фунт-масс/фут <sup>3</sup>	1 кг/м <sup>3</sup> = 0,062428 фунт-масс/фут <sup>3</sup>	1 фунт-масс/фут <sup>3</sup> = 16,018 кг/м <sup>3</sup>

## Земная атмосфера

Преобладающая часть массы земной атмосферы содержится в ближайшем к поверхности Земли слое толщиной менее 6 км. По сравнению с диаметром Земли (12 700 км) это относительно тонкий слой — настолько тонкий, что если земной шар сравнить с баскетбольным мячом, то этот слой превратится в лист бумаги, обернутой вокруг мяча.

Атмосфера удерживается у поверхности Земли силой земного притяжения. Каждая воздушная частица, как мы видели, обладает весом. Так же как подброшенный вверх стеклянный шарик в конце концов падает на землю, так и частицы воздуха вновь и вновь возвращаются к земной поверхности. Но хотя эти частицы движутся слишком быстро для того, чтобы сила тяжести успела существенно повлиять на их движение за короткий отрезок времени, тем не менее медленно работающему земному притяжению удается удерживать частицы в относительной близости к земной поверхности. Частица воздуха, как и с силой брошенный в воздух шарик, вначале будет двигаться по прямой линии, но затем ее траектория изогнется дугой, и в конце концов частица начнет падать. Только самым легким и быстрым атмосферным частицам — молекулам водорода и гелия — иногда удается преодолеть земное притяжение и улететь в космическое пространство.

В то время как сила тяжести тянет атмосферу вниз, давление воздуха толкает ее вверх. Когда частицы воздуха, падая, приближаются к земной поверхности, их плотность, а равно и давление, возрастают. Именно это давление воздуха поддерживает атмосферу и не дает ей «сплюснуться» и лечь на Землю.

Чтобы понять, как земное притяжение и давление воздуха формируют структуру атмосферы, представьте себе воздушный столб с площадью сечения 1 м<sup>2</sup> в виде стопки блоков воздуха массой 1 кг каждый (рис. 5.1.2). Эти блоки поддерживают друг друга давлением и образуют стопку из примерно 10 000 блоков. Нижний блок плотно сжат: он должен выдерживать вес всех остальных, расположенных над ним. Его высота — около 0,8 м, плотность — 1,25 кг/м<sup>3</sup>, а давление — примерно 100 000 Па. Лежащий на нем блок имеет меньший вес и уже не так плотно сжат. Чем выше мы поднимаемся, тем меньше плотность воздуха и его давление.

Структура атмосферы напоминает структуру этого столба. Воздух вблизи Земли поддерживает вес нескольких километров воздуха над собой, и в результате плотность его равна 1,25 кг/м<sup>3</sup>, а давление составляет 100 000 Па; на больших высотах, однако, плотность и давление воздуха уменьшаются, так как находящийся еще выше слой атмосферы уже достаточно тонок и воздуху не нужно поддерживать такой большой вес. Поэтому на больших высотах воздух значительно более разрежен, чем на малых. Независимо от высоты, давление окружающего воздуха называют атмосферным давлением.

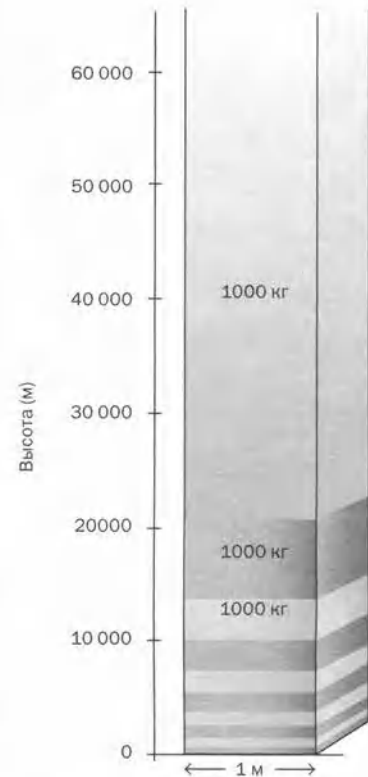


Рис. 5.1.2. Масса воздуха в столбе атмосферы с сечением 1 м<sup>2</sup> составляет примерно 10 000 кг. Нижние 1000 кг сжаты наиболее плотно, поскольку поддерживают большую часть веса. На большей высоте воздух не так плотно сжат, потому что на него давит меньший вес.

До сих пор мы говорили о воздухе, давлении воздуха и об атмосфере. Хотя может показаться, что это не имеет отношения к воздушным шарам, но на самом деле эти вопросы напрямую связаны с поддержанием в воздухе шаров, наполненных горячим воздухом или гелием. Как мы уже знаем, воздух в атмосфере Земли представляет собой флюид — текучую среду, бесформенную субстанцию, обладающую массой и весом. Воздух имеет давление и прикладывает силы к поверхностям, с которыми соприкасается; это давление максимально у поверхности Земли и уменьшается с увеличением высоты. Давление воздуха и его изменение с высотой позволяют воздуху поднимать наполненные горячим воздухом или гелием шары при помощи так называемой выталкивающей силы.

Выталкивающую силу впервые описал более двух тысяч лет назад греческий математик Архимед (287–212 до н. э.). Архимед понял, что на тело, частично или полностью погруженное в жидкость, действует направленная вверх выталкивающая сила, равная весу вытесненной им жидкости. На самом деле закон Архимеда универсален и применим к телам, плавающим или погруженным в любые флюиды, в том числе в воздух, воду или масло. Выталкивающая сила равна сумме сил, с которыми флюид действует на поверхность тела. Мы видели, что такие силы бывают довольно существенными, но, как правило, компенсируют друг друга. Как же в таком случае давление может создать отличную от нуля суммарную силу, действующую на тело, и почему эта сила направлена вверх?

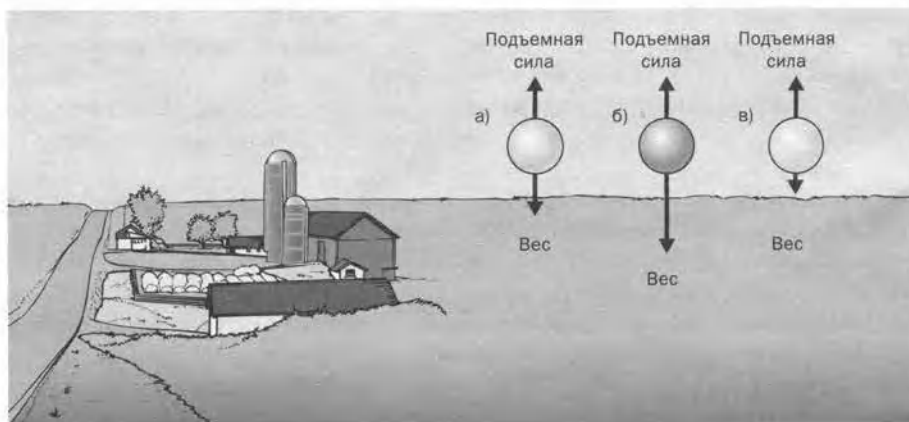
### Закон Архимеда

На тело, полностью или частично погруженное во флюид, действует направленная вверх выталкивающая сила, равная весу вытесненного объема флюида.

Если бы не было силы тяжести, силы идеально уравнивали бы друг друга, потому что давление неподвижной текучей среды было бы одинаковым со всех сторон. Но вследствие гравитации давление неподвижной среды уменьшается с ростом высоты. Например, когда ни тело, ни окружающий воздух не движутся, давление воздуха под телом всегда больше, чем давление воздуха над ним. Таким образом, воздух толкает тело снизу вверх сильнее, чем давит на него же сверху вниз, а само тело, следовательно, испытывает действие направленной вверх равнодействующей силы со стороны воздуха — выталкивающей силы.

Насколько велика эта действующая на тело выталкивающая сила? По величине она равна весу флюида, вытесненного телом. Чтобы понять этот знаменитый вывод, представьте себе, будто флюид был вытеснен не телом, а таким же флюидом, имеющим ту же форму и объем, что и тело (рис. 5.1.3, а). Поскольку выталкивающая сила действует со стороны окружающего флюида, а не погруженного в него тела, эта сила не зависит от материала тела. Шар, наполненный гелием, будет испытывать такую же выталкивающую силу, как точно такой же шар, наполненный водой, свинцом или даже воздухом. Таким образом, если заменить тело на порцию флюида той же формы и такого же объема, то действующая на него выталкивающая сила не изменится.

**Рис. 5.1.3.** (а) На порцию воздуха, погруженную в такой же воздух, действует направленная вверх выталкивающая сила, равная его весу, поэтому данная порция не ускоряется. (б) Если тело тяжелее вытесненного им объема воздуха, то оно опускается вниз, в то время как (в) другое тело, которое легче вытесненного им объема воздуха, поднимается вверх.



Однако порция жидкости (или газа), погруженная в такую же жидкость (или газ), не приобретает ускорения. Она остается на месте, следовательно, действующая на нее результирующая сила совершенно точно равна нулю. У этой порции флюида есть направленный вниз вес, который должен быть уравновешен некими направленными вверх силами, источником которых может быть только окружающая текучая среда. Эта направленная вверх сила и есть сила выталкивания, которая по величине всегда равна весу порции флюида (соответствующей формы и объема), вытесненной помещенным в него телом.

Закон Архимеда объясняет, почему некоторые тела плавают, а другие тонут. На тело, погруженное в жидкость, действуют две силы: направленный вниз вес и направленная вверх сила выталкивания. Если вес тела превышает силу выталкивания, оно опускается вниз (рис. 5.1.3, б); если вес меньше силы выталкивания, тело поднимается вверх (рис. 5.1.3, в). И если эти две силы равны, тело не будет ускоряться. Если в последнем случае воздушный шар был неподвижен, то он и останется неподвижным и будет висеть в воздухе с постоянной скоростью, равной нулю.

Определить, будет ли тело плавать или тонуть, можно, предварительно оценив его плотность. Тело, средняя плотность которого больше, чем плотность окружающей текучей среды, тонет, в то время как тело, плотность которого меньше, — всплывает. Например, наполненный водой шар в воздухе будет падать (“тонуть”), так как средняя плотность воды и резины выше, чем плотность воздуха. Если удвоить объем шара, в два раза увеличатся и вес, и выталкивающая сила, так что он все равно будет падать. Общий объем тела не так важен, как то, как его плотность соотносится с плотностью окружающей текучей среды.

## Воздушные шары, наполненные горячим воздухом

Поскольку воздух — очень легкая субстанция (плотность его, как мы говорили, всего лишь  $1,25 \text{ кг/м}^3$ ), существует очень немного объектов, которые могут парить в воздухе. Возьмем для примера шар, внутри у которого вакуум. Если представить себе, что этот шар имеет очень тонкую внешнюю оболочку, то такой шар почти ничего не будет весить, а его средняя плотность будет близка к нулю. Так как незначительный вес шара намного меньше направленной вверх выталкивающей силы, пустой шар легко устремится вверх.

К сожалению, долго этот пустой шар не протянет: ведь он окружен воздухом, имеющим атмосферное давление, и на каждый квадратный метр оболочки шара будет действовать направленная внутрь сила  $100\,000 \text{ Н}$ . Так как внутри шара нет ничего, что могло бы противостоять этой сокрушительной силе, шар просто будет раздавлен. Будь у шара толстая жесткая оболочка, он еще мог бы выдержать давление окружающего воздуха, но тогда средняя плотность шара была бы гораздо выше и шар бы упал. Таким образом, шар с вакуумом внутри летать не может.

А вот что может летать, так это шар, наполненный чем-то, что давит изнутри на оболочку с силой, равной внешнему давлению окружающего воздуха. В этом случае каждый участок оболочки будет испытывать нулевую результирующую силу и шар не будет раздавлен. Можно было бы заполнить воздушный шар просто окружающим воздухом, но тогда средняя плотность будет слишком высока. Вместо этого нам нужно найти флюид, который имеет такое же давление, как окружающий воздух, но более низкую плотность.

Одним из флюидов, имеющих более низкую плотность при атмосферном давлении, является горячий воздух. Чтобы наполнить наш воздушный шар горячим воздухом, требуется меньше частиц, чем при накачивании его холодным воздухом, так как каждая частица горячего воздуха движется быстрее и вносит больший вклад в общее давление, чем частица холодного воздуха. Таким образом, горячий воздушный шар содержит меньше частиц, имеет меньшую массу и весит меньше, чем если бы он был наполнен холодным воздухом. Теперь у нас есть пригодный для практического использования шар с меньшей средней плотностью, чем у окружающего воздуха. Под действием подъемной силы — результирующей между выталкивающей силой и весом — шар полетит вверх (рис. 5.1.4).

Поскольку давление воздуха внутри шара такое же, как снаружи, воздух не будет стремиться ни внутрь шара, ни наружу из него (почему — рассмотрим в следующем разделе), поэтому воздушный шар необязательно делать

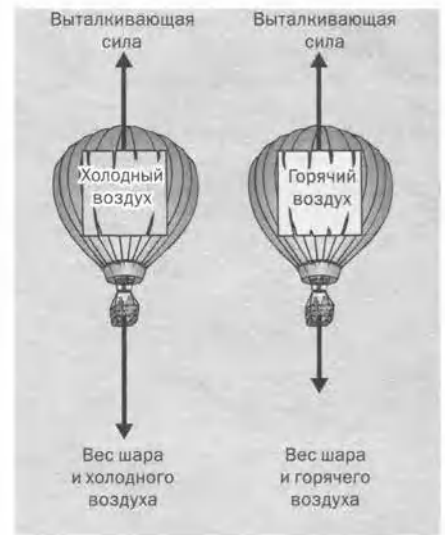
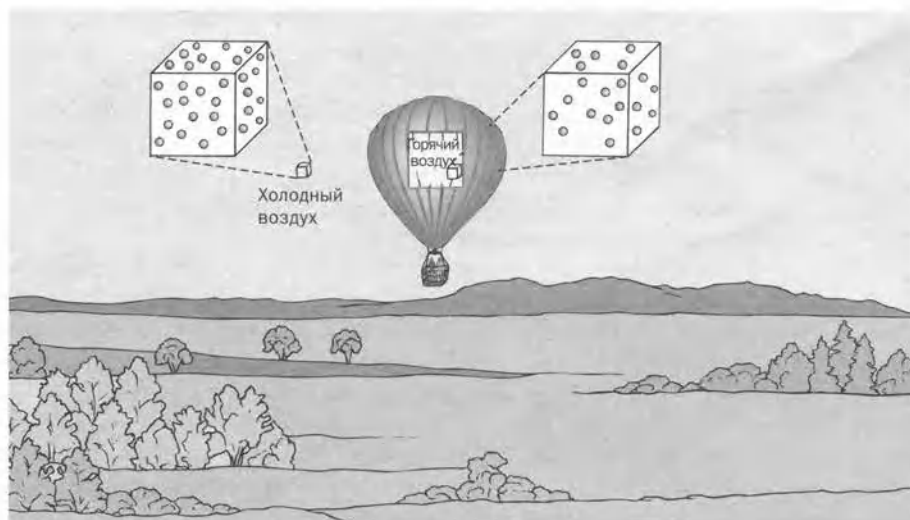


Рис. 5.1.4. Чтобы заполнить воздушный шар горячим воздухом, нужно меньше частиц, чем для заполнения холодным воздухом. Дело в том, что в среднем частица горячего воздуха движется быстрее, сталкивается чаще и эффективно занимает больше места, чем частица холодного воздуха. Поэтому шар, наполненный горячим воздухом, весит меньше, чем такой же шар, наполненный холодным. Если вес шара достаточно мал, равнодействующая сила, действующая на него, направлена вверх, и шар поднимается.



Рис. 5.1.5. Отверстие в нижней части воздушного шара остается открытым, чтобы горячий воздух мог входить внутрь, а холодный — выходить наружу. Горячий воздух вытесняет больший объем по сравнению с холодным, поэтому воздушный шар становится легче.

**Рис. 5.1.6.** Куб горячего воздуха содержит меньше частиц, чем аналогичный куб холодного воздуха. Так как горячий воздух весит меньше, чем вытесненный им холодный, на горячий воздух внутри шара действует направленная вверх сила выталкивания, превышающая его вес.



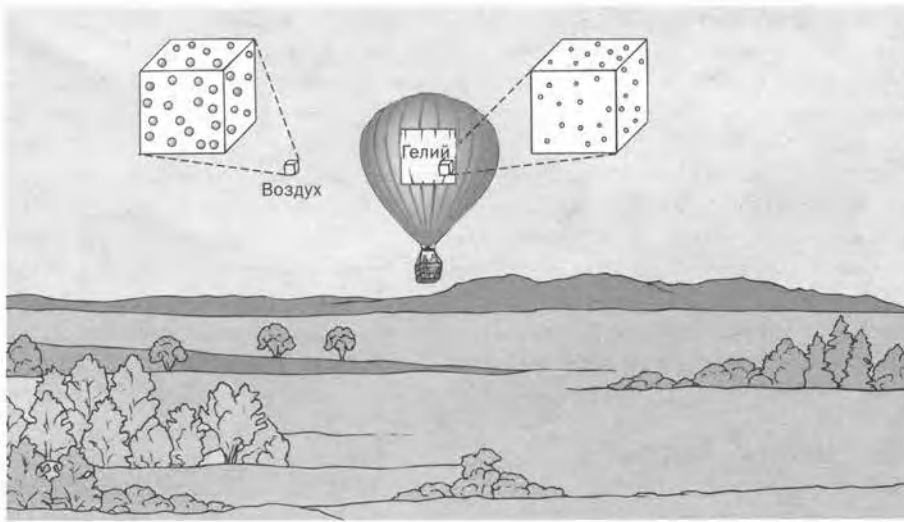
герметичным (рис. 5.1.5). Большая пропановая горелка, расположенная под отверстием в шаре, нагревает воздух, заполняющий оболочку. Чем горячее воздух в оболочке, тем ниже его плотность и тем меньше вес шара. Пилот контролирует пламя так, чтобы вес шара был почти равен выталкивающей силе, действующей на шар. Если пилот поднимает температуру воздуха, количество частиц в оболочке уменьшается, вес шара снижается и он взмывает вверх. Если пилот позволяет воздуху остыть, частицы проникают в оболочку, вес шара увеличивается и он опускается.

Но даже если очень сильно нагревать воздух в шаре, он не будет подниматься вверх до бесконечности. По мере подъема шара воздух и внутри, и вокруг него становится все более разреженным, а значит, уменьшается давление как внутри, так и снаружи оболочки. Хотя вес шара уменьшается (поскольку воздух внутри него становится более разреженным), выталкивающая сила уменьшается еще быстрее, и чем выше, тем меньше груза может поднять шар. В какой-то момент воздух становится настолько разреженным, что воздушный шар перестает подниматься: он достигает потолка полета, который не может преодолеть, даже если включить горелку на полную мощность. Для каждой температуры горячего воздуха существует своя высота полета, на которой шар зависнет. Когда воздушный шар достигает этой высоты, он находится в состоянии устойчивого равновесия. Если шар по каким-то причинам опускается вниз, на него начинает действовать направленная вверх результирующая сила, если поднимается вверх — результирующая сила будет направлена вниз.

## Гелиевые воздушные шары

Хотя в состав горячего и холодного воздуха входят одни и те же частицы, в каждом кубическом метре горячего воздуха их содержится меньше, чем в каждом кубическом метре холодного. Число частиц в единице объема мы называем объемной концентрацией частиц, и величина эта в горячем воздухе меньше, чем в холодном (рис. 5.1.6). Поскольку состав воздуха одинаков, плотность горячего воздуха также ниже, чем плотность холодного. Горячий воздух поднимается вверх под действием выталкивающей, точнее, подъемной силы — результирующей между весом и силой Архимеда.

Но существует и другой способ заставить один газ взлетать в другом: использовать газ, состоящий из очень легких частиц. Атомы гелия, например, намного легче, чем частицы воздуха. При одинаковых давлении и температуре газообразный гелий и воздух также имеют одинаковые концентрации частиц. Но поскольку вес каждого атома гелия составляет 14% от веса усредненного веса частицы воздуха, то и вес  $1 \text{ м}^3$  гелия составляет 14% от веса  $1 \text{ м}^3$  воздуха (то есть гелий примерно в семь раз легче). Таким образом, наполненный гелием воздушный шар весит намного меньше, чем тот объем воздуха, который он вытесняет, и подъемная сила легко несет его вверх.



**Рис. 5.1.7.** Куб гелия содержит такое же количество частиц, что и равных размеров куб воздуха. Однако каждая частица гелия весит меньше, чем средняя частица воздуха. Поскольку гелий весит меньше, чем вытесненный им воздух, на гелий внутри шара действует направленная вверх сила выталкивания, превышающая его вес.

Возникает вопрос, почему же концентрация частиц в воздухе и гелии одинакова при одних и тех же температуре и давлении? Ответ: потому что вклад частицы газа в давление не зависит от ее массы (веса). При любой температуре все частицы газа, независимо от массы, обладают одинаковой средней кинетической энергией поступательного движения. Несмотря на то, что атом гелия намного легче, чем частица воздуха, в среднем он движется гораздо быстрее и сталкивается с другими атомами чаще, чем частица воздуха. В результате более легкие, но быстрые атомы гелия вносят такой же вклад в создание давления, как и более тяжелые, но медленные частицы воздуха. Таким образом, если вы позволите атомам гелия внутри оболочки воздушного шара распространиться так, чтобы давление и температура внутри и снаружи сравнялись, концентрации частиц внутри и вне шара также будут равны (**рис. 5.1.7**). Но поскольку атомы гелия внутри шара намного легче, чем частицы воздуха снаружи, шар весит меньше, чем воздух, который он вытесняет, следовательно, шар будет подниматься вверх под действием подъемной силы — равнодействующей между весом и выталкивающей силой.

Давление газа пропорционально произведению объемной концентрации частиц на абсолютную температуру:

$$\text{давление} \propto \text{объемная концентрация частиц} \times \text{абсолютная температура} \quad (5.1.2).$$

Эта пропорциональность соблюдается независимо от химического состава газа. Предыдущая пропорция (уравнение 5.1.1) работает только до тех пор, пока состав газа остается неизменным, так что плотность и объемная концентрация частиц остаются пропорциональными друг другу. Но теперь у нас есть соотношение, которое можно применить гораздо шире.

Уравнение 5.1.2 с соответствующим коэффициентом пропорциональности называется законом идеального газа или уравнением состояния идеального газа. Этот закон устанавливает связь между давлением, объемной концентрацией частиц и абсолютной температурой для идеального газа (то есть такого, в котором частицы совершенно независимы одна от другой). Он также с определенными оговорками применим и для реальных газов, в которых частицы взаимодействуют между собой. Коэффициент пропорциональности называется постоянной Больцмана, и значение ее составляет  $1,381 \times 10^{-23} \text{ Па} \times \text{м}^3 / (\text{число частиц} \times \text{К})$ .

Используя постоянную Больцмана, закон идеального газа можно записать в следующем виде:

$$\text{давление} = \text{постоянная Больцмана} \times \text{объемная концентрация частиц} \times \text{абсолютная температура} \quad (5.1.3).$$

### **Закон (уравнение состояния) идеального газа**

Давление газа равно произведению постоянной Больцмана на объемную концентрацию частиц и на абсолютную температуру.

❶ В США газообразный гелий получают в качестве побочного продукта при добыче подземного природного газа, так как гелий образуется в процессах медленного радиоактивного распада урана и других нестабильных элементов. Хотя некоторое количество этого гелия используется в промышленности, большая часть просто выбрасывается в атмосферу. Есть еще только один источник гелия — это атмосфера, где его содержание составляет 5 частей на миллион. После того как истощатся подземные источники, гелий станет относительно редким и дорогим газом.

❷ Гелиевые дирижабли, хотя и более надежные, тоже могут быть довольно легко уничтожены в результате погодных катаклизмов. “Шенандоа”, один из двух американских дирижаблей-цепелинов, построенных по немецкому проекту, 3 сентября 1925 года потерпел аварию, попав в зону воздушной турбулентности недалеко от города Ава, штат Огайо. Толпа посетителей местной ярмарки сразу же бросилась на место катастрофы в поисках сувениров.

❸ Жесткие дирижабли по-английски называются *airships*, то есть “воздушные корабли”. Они не зря получили такое название: это действительно были огромные корабли, плававшие по воздуху. К сожалению, водород, которым наполняли большинство дирижаблей, чтобы сделать их достаточно “легкими на подъем”, очень горюч. Дирижабль “Гинденбург” сгорел 6 мая 1937 г. при посадке в Лейкхерсте, штат Нью-Джерси. Поскольку водород легче воздуха, основной пожар разгорелся в верхней части оболочки, и многим пассажирам удалось уцелеть.

Гелий — не единственный газ легче воздуха. Водород, который в два раза легче гелия, также можно использовать для наполнения воздушных шаров. Но не стоит ожидать, что водород может поднять в два раза больше веса, чем гелий. Грузоподъемность воздушного шара определяется подъемной силой, то есть разностью между направленной вверх выталкивающей силой и направленным вниз весом. И хотя газ в шаре, наполненном водородом, весит вдвое меньше, чем в гелиевом шаре такого же объема и формы, на оба шара действует одинаковая выталкивающая сила. Таким образом, грузоподъемность водородного шара ненамного больше, чем гелиевого. Основные преимущества водорода по сравнению с гелием — это его дешевизна и доступность (см. ❶). С другой стороны, водород имеет опасный недостаток — он очень легко воспламеняется (см. ❷), и поэтому его стараются не применять в ситуациях, когда безопасность особенно важна. Тем не менее даже с гелиевыми аэростатами случаются катастрофы (см. ❸).

## Эластичные шары

Молекулы в воздушном шаре, имеющем отверстие в нижней части, постоянно обмениваются с молекулами окружающего воздуха: некоторые молекулы выходят из шара наружу, другие поступают внутрь. Такое перемещение молекул называется диффузией, и это явление возникает в результате теплового движения отдельных молекул. Между прочим, именно благодаря диффузии запахи разносятся по помещению, даже когда воздух в нем неподвижен: молекулы пахучего вещества интенсивно движутся, сталкиваются с воздушными частицами и постепенно распространяются по всей комнате. Для шара, наполненного горячим воздухом, диффузия не имеет значения, потому что холодные молекулы газа, попав в воздушный шар, все равно быстро нагреваются в пламени горелки.

А вот для гелиевого шара диффузия представляет собой серьезную проблему. Если гелиевый шар оставить внизу открытым, то атомы гелия в процессе диффузии будут выходить наружу, а более тяжелые молекулы воздуха — проникать внутрь. В результате вес воздушного шара будет постепенно расти, и в конце концов он уже не будет способен держаться в воздухе. Что еще хуже, атомы гелия движутся очень активно, поэтому диффузия будет протекать очень быстро. Собственно говоря, они движутся так быстро и настолько малы, что даже могут проникать через некоторые твердые тела — например, через резиновую оболочку воздушного шара.

Чтобы замедлить утечку гелия, гелиевые шары, как правило, герметически закрыты (рис. 5.1.8). Но и герметичный гелиевый шар постепенно сдувается, потому

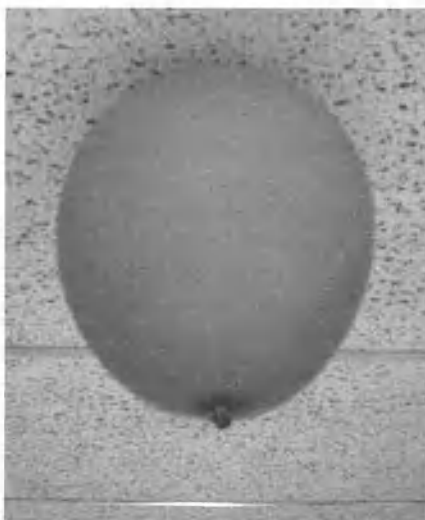


Рис. 5.1.8. Чтобы предотвратить диффузию гелия наружу, а воздуха внутрь шара, гелиевые шары герметизируют.

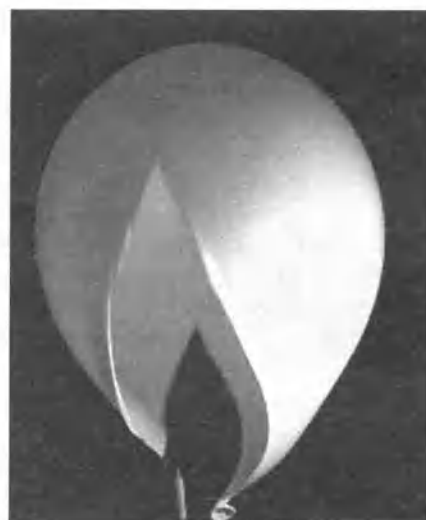


Рис. 5.1.9. Этот шар лопнул после того, как в него попала небольшая пуля. Внезапное высвобождение газа высокого давления создает громкий хлопок.



что атомы гелия, просачивающиеся наружу сквозь оболочку, почти не замещаются воздушными частицами. Детские воздушные шарик (резиневая оболочка, заполненная гелием) теряют газ так быстро, что теряют способность летать уже через один-два дня. Более совершенные шарик, изготовленные из полиэфирной пленки, гораздо более устойчивы к диффузии и могут удерживать гелий в течение недели или двух (см. 4).

Обычные резиновые шарик, которыми с таким треском лопаются на вечеринках, с точки зрения физики представляют интерес как упругие тела. По мере наполнения гелием шарик растягивается от равновесной формы. При этом на него действует сила упругости оболочки, пытающаяся вернуть шарик к этой равновесной форме. В результате на каждый участок поверхности воздушного шара действует три силы: направленная внутрь сила давления наружного воздуха, направленная наружу сила давления гелия и направленная внутрь сила упругости растянутой эластичной оболочки шара. Поскольку каждый участок поверхности неподвижен, то он должен испытывать нулевую результирующую силу; направленная наружу сила должна уравнивать две направленные внутрь. Для поддержания равновесия нужно, чтобы давление гелия внутри шара было несколько выше, чем давление наружного воздуха.

Конечно, давление гелия внутри шара выше, чем давление наружного воздуха. Эта разница давлений объясняет, почему воздушный шар лопается, когда вы протыкаете его булавкой. Резина разрывается, мгновенно выпуская сжатый газобразный гелий. Треск, который вы слышите, производит главным образом выходящий на свободу газ (рис. 5.1.9).

По мере того как наполненный гелием воздушный шар поднимается вверх, давление окружающего воздуха снижается. Внутреннее же давление растягивает оболочку воздушного шара все больше, пока направленная внутрь упругая сила не станет достаточно большой, чтобы удержать гелий от дальнейшего расширения. Шар несколько увеличивается в объеме, и давление в нем падает. Чем выше поднимается шар, тем меньше становится сила, с которой атмосфера давит на оболочку шара, и тем больше должна растягиваться оболочка, чтобы удержать гелий, распирающий ее изнутри. В конце концов оболочка не выдерживает растяжения и лопается, выпуская газ. Как ни печально, именно такая судьба и постигла тот гелиевый шарик, который вы отпустили в небо когда-то в далеком детстве.

Иногда для доставки научных приборов к верхней границе атмосферы используют специальные гелиевые шары (рис. 5.1.10). Эти шары спроектированы таким образом, что гелий внутри них по мере набора высоты может очень значительно расширяться в объеме. Оболочка шара настолько легкая, что даже небольшое количество гелия может ее поднять. По мере того как шар поднимается, атмосферное давление вокруг него уменьшается, гелий внутри расширяется, становясь при этом менее плотным, и давление внутри шара приближается к давлению окружающей атмосферы. Оболочка постепенно растягивается, пока не раздувается до максимально возможного размера. К этому моменту воздушный шар может достичь высоты 50 км над землей.

## Плывем или тонем?

Почти все водные виды спорта: плавание, серфинг, подводное плавание, яхтенный спорт — в конечном счете зависят от плавучести. Если бы все тела тонули, чем бы мы занимались на пляже? Ну, разве что жарились бы на солнце или играли в песке. Плавучесть в воде зависит от выталкивающей силы — той же, что поддерживает полет воздушного шара. Как всегда, действующая на тело направленная вверх выталкивающая сила равна весу вытесненной им жидкости. Тело, плотность которого меньше плотности воды, например деревянный шар, легче вытесненной им воды, поэтому он всплывает. Тело, плотность которого больше плотности воды, например металлическая монета, тяжелее вытесненной ею воды, поэтому она тонет.

Так же, как и в воздухе, выталкивающая сила в воде тесно связана с давлением: давление, которое вода оказывает на тело снизу, превышает давление сверху, так что направленная вверх сила, которая возникает в результате давления снизу, больше силы, возникающей от давления сверху и направленной вниз. Тем не



Рис. 5.1.10. Исследовательский научный шар, наполненный гелием, готов отправиться в путешествие в верхние слои атмосферы. К тому моменту, когда шар достигнет рабочей высоты 40 км, его объем увеличится примерно в 100 раз.

4 Большинство пригодных для дальнейшей переработки пластиковых бутылок для безалкогольных напитков изготавливают из полиэтилентерефталата (в этом случае на бутылку ставится маркировка  $\Delta$ ). Поскольку этот пластик довольно эффективно препятствует диффузии, содержимое бутылки может оставаться свежим в течение года. Тем не менее молекулы углекислого газа, который придает газированным напиткам специфический “щекочущий” вкус, постепенно просачиваются через пластиковые стенки, и напиток перестает быть шипучим. С другой стороны, происходит постепенная диффузия в бутылку молекул кислорода из окружающей среды, и эти молекулы могут повлиять на вкус напитка. Поэтому срок годности у газированных напитков в пластиковых бутылках меньше, чем в стеклянных или металлических, которые более надежно препятствуют диффузии.

менее по своей природе давление воды несколько отличается от давления воздуха. Если давление воздуха обусловлено столкновениями воздушных частиц друг с другом и с ограничивающими воздух поверхностями различных тел, то давление воды вызывается силами, с которыми молекулы воды воздействуют друг на друга при столкновении. Хотя молекулы воды связаны друг с другом силами притяжения, которые проявляются, когда молекулы начинают удаляться одна от другой, эти же молекулы отталкиваются друг от друга, если слишком сближаются. Это свойство — притягиваться при растяжении и отталкиваться при сжатии делает воду практически несжимаемой: ее плотность очень мало изменяется при попытке сжать ее или, наоборот, разредить. Плотность воды всегда составляет примерно  $1000 \text{ кг/м}^3$ .

Если бы не было земного притяжения, давление в сосуде с водой было бы одинаковым в любой точке и зависело бы только от степени сжатия воды стенками сосуда. Но гравитация создает дополнительное давление в нижней части сосуда, потому что нижние слои воды должны поддерживать вес слоев, находящихся над ними. Подобно тому, как атмосферное давление возрастает ближе к Земле, так и в океане давление воды увеличивается тем сильнее, чем глубже вы погружаетесь. Огромное давление на больших глубинах объясняется тем, что вода на этой глубине должна поддерживать колоссальный вес воды, находящейся над ней.

Однако поскольку вода почти несжимаема, ее плотность практически постоянна независимо от глубины. Одно и то же несжимаемое тело на любой глубине вытесняет один и тот же объем (и соответственно вес) воды, так что всегда испытывает одну и ту же выталкивающую силу. Когда мы говорим о воздушном шаре, картина другая, потому что атмосфера становится менее плотной по мере увеличения высоты. Для воздушного шара существует потолок полета, выше которого выталкивающая сила слишком мала, чтобы придавать шару ускорение вверх. А в воде никакого “потолка полета” нет. Если тело обладает плавучестью, то оно всплывает с любой глубины до самой поверхности. Если же оно тонет, то пройдет весь путь вниз до самого дна.

Один интересный аспект плавания заключается в том, что мы всегда можем выбрать — держаться на воде или тонуть. Средняя плотность человеческого тела близка к плотности воды. Если бы мы были сделаны из камня, то всегда бы тонули, если бы из дерева — всегда бы плавали на поверхности. Но наше тело — это главным образом вода. Хотя плотность некоторых частей организма различна — кости и мышцы плотнее воды, зато жир имеет меньшую плотность, — все-таки наша средняя плотность очень близка к плотности воды. Держимся мы на воде или тонем, в значительной степени зависит от того, сколько воздуха в наших легких. Глубокий вдох может понизить среднюю плотность в достаточной степени, чтобы мы смогли лежать на воде, а выдох достаточно для того, чтобы пойти ко дну.

Телосложение также влияет на плавучесть человека. У толстяка с большими запасами жира относительно низкая средняя плотность, он будет легко держаться на воде, в то время как его костлявый приятель может и утонуть. Человеку с очень небольшим количеством жира может быть очень нелегко “зависнуть” на поверхности, даже если он сделает очень глубокий вдох. Поскольку его вес превышает направленную вверх выталкивающую силу, он сможет лежать на воде, только прилагая дополнительные усилия: получить дополнительную силу, направленную вверх, он может, толкая воду вниз руками и ногами, чтобы вода в ответ выталкивала его вверх.

Способность держаться на воде или тонуть можно сравнить со способностью парить или зависать в воздухе на какой-то определенной высоте. Для того чтобы тело зависло в толще воды, его средняя плотность должна быть точно равна плотности воды. Этого почти невозможно достичь без постоянной корректировки. Пассивные объекты, которые не могут регулировать собственную среднюю плотность, либо плавают, либо тонут. Люди, рыбы и подводные лодки (см. ❸) способны зависать между поверхностью и дном, поскольку могут приспосабливать свою среднюю плотность к плотности воды.

Так как ткани и кости плотнее воды и тянут тело вниз, ныряльщики используют воздух в собственных легких, чтобы понизить свою среднюю плотность до плотности воды. У рыб легких нет, и чтобы не утонуть, им нужен какой-то другой

❸ Подводную лодку проектируют таким образом, чтобы ее средняя плотность была близка к плотности воды. В этом случае, регулируя среднюю плотность судна, можно заставить лодку погружаться или всплывать. Для этого изменяют соотношение воздуха и воды в балластных цистернах. Расположенные между внешним (“легким”) и внутренним (“прочным”) корпусами подлодки, эти цистерны заполняются водой, увеличивая среднюю плотность, когда нужно опуститься глубже, или воздухом, когда нужно уменьшить среднюю плотность, чтобы всплыть. При определенном соотношении воздуха и воды подводная лодка будет обладать нейтральной плавучестью — равнодействующая вертикальных сил будет равна нулю, и лодка сможет оставаться на постоянной глубине. Поскольку подлодка не может подняться на поверхность, если у нее нет достаточного запаса воздуха, чтобы продуть балластные цистерны и вытеснить из них воду, сжатый воздух хранится в резервуарах внутри прочного корпуса.

инструмент. В процессе эволюции у костных рыб развился внутренний заполненный воздухом плавательный пузырь, который понижает их среднюю плотность до плотности воды. Более примитивные хрящевые рыбы, например акулы, не имеют плавательного пузыря, и без дополнительной направленной вверх силы они бы опустились на дно. Но эти обладающие высокой плотностью рыбы движутся сквозь воду подобно тому, как самолет летит по воздуху: сила, не дающая им пойти ко дну, возникает, когда они плавниками толкают воду вниз.

Аквалангистам намного сложнее балансировать в воде, так как баллоны со сжатым воздухом и гидрокостюм уменьшают среднюю плотность пловца. Чтобы сделать собственную среднюю плотность не меньшей, чем средняя плотность воды, аквалангисты надевают специальные пояса с грузами. В случае чрезвычайной ситуации аквалангист может сбросить этот пояс и всплыть на поверхность.

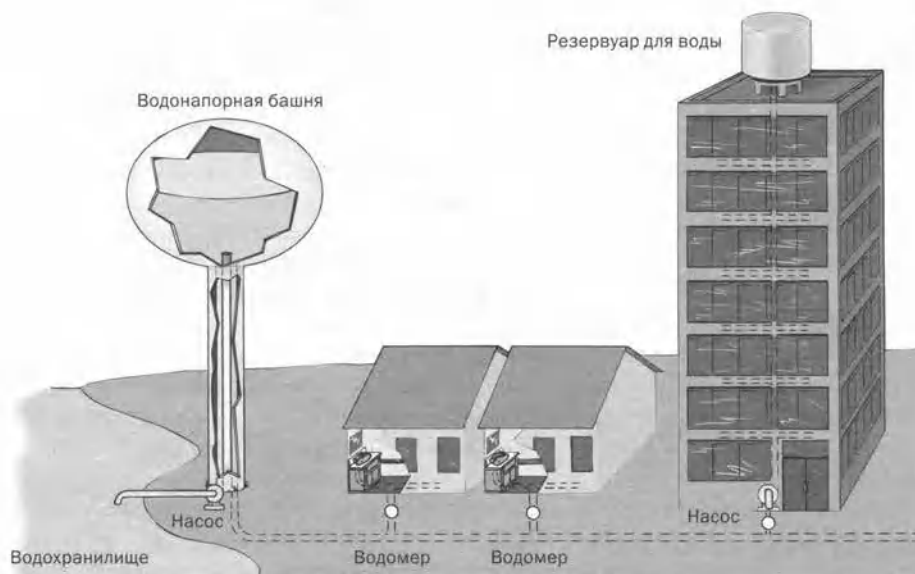
Тонущий предмет в конце концов начинает испытывать направленную вверх силу давления от морского дна, достаточную, чтобы он мог оставаться в состоянии покоя. Но почему плавающий объект остается на поверхности воды? Причина в том, что, когда часть объекта находится над поверхностью воды, эта часть его объема начинает вытеснять не воду, а воздух, и выталкивающая сила соответственно уменьшается. Если плотность плавающего объекта больше, чем у воздуха, но меньше, чем у воды, он будет плавать на поверхности, частично находясь в воде, а частично в воздухе. При этом объект будет погружен в воду ровно настолько, чтобы суммарный вес вытесненных им воды и воздуха был в точности равен его весу. Даже в этой комбинации двух сред закон Архимеда продолжает работать (см. 6)!

Люди, коряги, лодки и авианосцы — все эти объекты остаются на поверхности воды по одной и той же простой причине: они весят меньше, чем вода, которую бы они вытеснили при полном погружении. Каждый объект поднимается из воды настолько, чтобы его вес был равен весу вытесненного им суммарного объема флюидов, воды и воздуха. И если вы задаетесь вопросом: “Почему паровоз железный, а не тонет?”, то ответ заключается в том, что внутри судна имеется огромное количество воздуха, в результате чего его средняя плотность намного меньше, чем у воды, — настолько меньше, что судно легко держится на воде и даже возвышается над ее поверхностью. Однако если в подводной части судна образуется пробоина, то вода вытесняет воздух, средняя плотность стремительно увеличивается и судно тонет.

Прежде чем закончить с темой плавания, нужно упомянуть еще два аспекта. Во-первых, существует способ изменить плотность воды: растворить в ней определенные химические реагенты. Если добавить в воду соль, то это увеличит ее плотность. Благодаря тому, что плотность соленой океанской воды примерно на 3% больше плотности пресной, она действует на погруженные в нее тела с большей выталкивающей силой, чем пресная. Человеку легче держаться на поверхности воды в море или океане, чем в озере или реке. Правда, некоторые внутренние моря и озера бывают еще более солеными, чем океан. Соленость и плотность вод Мертвого моря и Большого Соленого озера настолько велики, что человек может лежать на поверхности этих водоемов без всяких усилий.

Во-вторых, плавающий или тонущий объект рано или поздно теряет ускорение. Причина в том, что при движении в воде тело испытывает действие силы сопротивления, подобной трению. Как я покажу в разделе 5.2, эта сила сопротивления препятствует движению тела и преобразует его упорядоченную энергию в тепловую. Чем быстрее движется тело в воде, тем больше сила сопротивления. На тонущий объект, например, действует направленная вверх сила сопротивления, возрастающая по мере увеличения направленной вниз скорости, пока, наконец, сила сопротивления не останавливает ускорение. После этого тело продолжает опускаться с постоянной равновесной скоростью. Аналогичным образом всплывающий объект, например пузырек воздуха, рано или поздно достигает направленной вверх равновесной скорости.

6 В неподвижной бутылке вода находится внизу, а воздух — в верхней части. Это можно рассматривать как пример плавучести: один флюид (воздух) плавает на поверхности другого флюида (воды). Примеров, когда одни флюиды плавают поверх других, на удивление много. Например, растительное масло имеет меньшую плотность, чем уксус, поэтому заправка для салата в бутылке обычно разделяется на слой масла, плавающий поверх слоя уксуса. Специи и другие ингредиенты, плотность которых меньше, чем у уксуса, но больше, чем у масла, как правило, концентрируются на границе раздела между двумя жидкостями. В соответствии с законом Архимеда, эти компоненты заправки вытесняют такой суммарный объем масла и уксуса, чтобы направленная вверх выталкивающая сила в точности уравновешивала их вес.



## 5.2. Водопровод

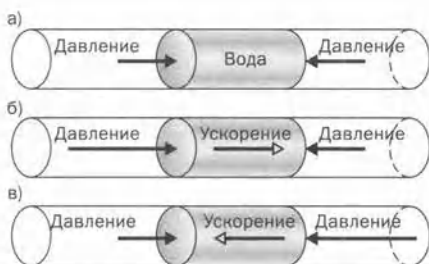
Теперь, когда мы рассмотрели поведение физических тел во флюидах, давайте обратимся к поведению флюидов в физических телах. В этом разделе мы познакомимся с системами распределения воды, увидим, что давление, плотность и вес так же важны в водоснабжении и сантехнике, как и в воздухоплавании. Для простоты мы сосредоточимся на том, каким образом вода течет по водопроводным трубам, и отложим до следующей главы большую часть сложных вопросов, связанных с движением как таковым. В частности, мы можем пока пренебречь сопротивлением и вязкостью, а также изменениями давления, которые сопровождают движение жидкости.

### Давление воды

Чтобы система водоснабжения работала, нужны две вещи: водопроводные сети и давление воды. Сети доставляют воду, а течет вода по сетям благодаря давлению. Давление воды очень важно, поскольку, как и все остальные тела и флюиды, вода имеет массу и ускоряется, только если приложить к ней силу. Если бы на воду в момент, когда вы открываете кран, не действовала бы никакая сила, то вода просто не потекла бы из крана. Так как сила, которая двигает воду по трубам, возникает главным образом за счет разности давлений, то мы для начала должны внимательно рассмотреть, каким образом создается и регулируется давление воды.

Мы начнем изучать этот вопрос, пренебрегая силой тяжести. Как мы уже видели на примере атмосферы, гравитация создает в текучих средах градиенты давления — то есть распределение давления, непрерывно меняющегося в зависимости от высоты (глубины). Давление уменьшается с увеличением высоты и возрастает с увеличением глубины, и эти изменения давления по вертикали усложняют работу водопроводных сетей в небоскребах и в городах с сильным перепадом рельефа. Но если вся наша водопроводная система расположена на одном уровне (например, мы проводим воду в одноэтажный дом, стоящий на плоской равнине), наша задача становится заметно проще. При отсутствии значительных перепадов высот мы можем спокойно игнорировать гравитацию, так как воде не нужно подерживать собственный вес и влияние силы тяжести будет минимальным.

В этом упрощенном случае вода приобретает ускорение только в ответ на некомпенсированное давление. Подобно тому, как твердое тело ускоряется, если силы, действующие на него, не уравновешены, так и перепад давления заставляет флюиды ускоряться. Если давление воды на всем протяжении трубы одинаково, то на каждую порцию воды действует нулевая равнодействующая сила и эта порция не ускоряется: она либо остается неподвижной, либо течет с постоянной



**Рис. 5.2.1.** (а) Если на воду в горизонтальной трубе с обеих сторон действует одинаковое давление, то вода не будет ускоряться. (б, в) Если давление вдоль трубы неоднородно, то на каждую порцию воды будет действовать возникающая в результате дисбаланса результирующая сила и вода будет ускоряться в направлении более низкого давления.

скоростью (рис. 5.2.1, а). Но если имеется дисбаланс давления, то на каждую порцию воды будет действовать отличная от нуля равнодействующая сила, в результате чего вода с ускорением начнет двигаться в сторону более низкого давления (рис. 5.2.1, б, в).

Слово “ускорение” не означает, что вода немедленно начнет двигаться. Вследствие инерции вода постепенно меняет скорость: она движется то быстрее, то медленнее, а то и поворачивает в сторону — в зависимости от того, где самое низкое давление. Комбинируя высокие и низкие давления, можно прогнать воду по весьма запутанному лабиринту труб, и именно таким способом вода проходит долгий путь от городской насосной станции до вашего дома. Любое изменение скорости на этом пути вызвано перепадом давления.

Перепад давления в воде можно создать, просто сжав ее в какой-либо части. Давление в сжатой части заставит воду двигаться в сторону низкого давления. Поскольку такого рода изменение давления не вызвано движением воды, его называют статическим изменением. Но движение воды само по себе также может вызывать изменения давления, и эти динамические изменения могут быть сложными и разнообразными. Как мы увидим в следующей главе, именно ими объясняются такие разнообразные явления, как разбрызгивание воды из сопла садового шланга, подъемная сила, действующая на крыло самолета и искривление траектории теннисного или бейсбольного мяча.

## Водяные насосы и давление

Чтобы заставить воду течь по водопроводу в городе, в котором нет ни холмов, ни оврагов, вам понадобится водяной насос — устройство, которое использует механическую работу, чтобы перемещать по трубе воду, находящуюся под давлением. В простейшем случае водяной насос сжимает порцию воды и повышает ее давление, чтобы вода направилась в область низкого давления. Насос продолжает сжимать воду, пока она течет по трубам.

Чтобы понять, как работает насос, представьте герметически закрытую пластиковую бутылку, доверху наполненную водой. Пока вы не сжимаете бутылку, внутри нее сохраняется давление, равное атмосферному (как вы помните, мы пренебрегаем силой тяжести). Но если вы сожмете бутылку, приложив тем самым к воде усилие, направленное снаружи внутрь, вода отреагирует противоположно направленной силой (третий закон Ньютона) и сделает это, увеличивая собственное давление. Чем сильнее вы нажимаете, тем с большей силой вода давит в ответ и тем выше становится ее давление.

Поскольку вода, как и все жидкости, несжимаема и почти не меняется в объеме при увеличении давления, бутылка, которую вы сжимаете, не станет меньше. Но давление воды в ней может повыситься достаточно существенно. Для того чтобы получить давление в два раза выше исходного, атмосферного, требуется лишь нажать пальцем на небольшой участок бутылки.

Давление увеличивается равномерно по всему объему бутылки — это явление известно как закон Паскаля: изменение давления в замкнутом объеме несжимаемой жидкости передается без изменений во всех направлениях в любую точку жидкости и на поверхность сосуда. Такое одновременное равномерное повышение давления приводит к тому, что на крышку бутылки начинает действовать направленная вверх сила. Если бы размер и площадь поверхности крышки были больше, направленная вверх сила могла бы оказаться достаточно велика, чтобы сорвать крышку. Это явление лежит в основе действия гидравлических систем и подъемников, когда давление, созданное в несжимаемой жидкости приложением небольшой силы к небольшому участку резервуара с жидкостью, приводит к возникновению большой силы, действующей на большой участок площади резервуара (рис. 5.2.2). Это также объясняет, почему у пластиковых бутылок для жидкостей отверстия и крышечки, как правило, делают маленького диаметра и почему пластиковые контейнеры с широким горлом лучше подходят не для жидкостей, а для конфет, печенья или орехов.

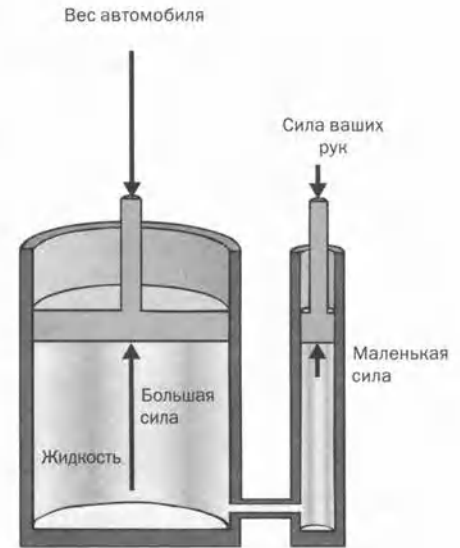


Рис. 5.2.2. Сила, с которой жидкость под давлением действует на поршень, пропорциональна площади его поверхности. На этом принципе основаны гидравлические системы, в которых маленькая сила, приложенная к небольшому поршню, создает в сжатой жидкости такое давление, что последняя уже с большой силой действует на большой поршень. На этом рисунке показано, как достаточно слабое нажатие на малый поршень уравнивается небольшой направленной вверх силой, действующей на этот малый поршень со стороны сжатой жидкости. В то же время сильный нажим от автомобиля на большой поршень уравнивается направленной вверх большой силой, действующей на этот большой поршень со стороны находящейся под давлением жидкости. Если малый поршень быстро опускается с постоянной скоростью, большой поршень будет медленно подниматься с постоянной скоростью и вы сможете совершить работу по подъему тяжелого автомобиля на короткое расстояние при помощи небольшого нажатия, сдвинув малый поршень вниз на большое расстояние. Гидравлическая система дает вам выигрыш в силе и позволяет поднять тяжесть, которую вы в ином случае поднять бы не смогли.

---

### Закон Паскаля

Изменение давления в замкнутом объеме несжимаемой жидкости передается без изменений во все точки жидкости и на поверхность сосуда.

---

Посмотрим, что будет, если снова надавить на бутылку, но уже со снятой крышечкой. Нажав в определенном месте, мы снова повышаем в этом месте давление, и вода теперь может свободно двигаться в направлении более низкого давления — то есть в область над открытым горлом бутылки. По мере того как давление внутри бутылки поднимается, вода начинает ускоряться. Результат — фонтан!

Вы перекачиваете воду и при этом совершаете работу: когда вода вытекает из бутылки, ваши пальцы смещаются внутрь, к ее центру. Так как вы нажимаете на воду снаружи внутрь, а вода движется изнутри наружу, вы совершаете работу над водой. Насосы совершают работу, когда перекачивают воду под давлением, и вода под давлением несет энергию, соответствующую этой работе.

Бутылка в течение короткого времени может работать как насос, однако вода в ней быстро закончится. Более практичный насос изображен на **рис. 5.2.3**. В этом насосе поршень ходит взад и вперед в открытом конце нолого цилиндра; вода не может просочиться между поршнем и стенками цилиндра, поскольку водонепроницаемое уплотнение на поршне обеспечивает герметичность. При нажатии поршня вода в цилиндре сжимается, повышается ее местное давление, вода приходит в движение и начинает течь.

В отличие от обычной бутылки, цилиндр этого насоса легко наполнить вновь. Цилиндр имеет два отверстия, и каждое снабжено клапаном, который позволяет воде течь только в одном направлении. Вода может вытекать из цилиндра только через верхнее отверстие и входить в него только через нижнее. Когда вы толкаете поршень в заполненный водой цилиндр, давление воды в нем поднимается и вода с ускорением выходит через верхний клапан. Когда вы вытягиваете поршень, давление воды внутри цилиндра падает и вода начинает с ускорением засасываться в него через нижний клапан. Фактически при вытягивании поршня давление внутри цилиндра падает ниже атмосферного, так что даже вода из ближайшего открытого водоема, если соединить его трубой с цилиндром, устремится в направлении частичного вакуума в цилиндре и наполнит его.

---

### Транспортировка воды: давление и энергия

---

Насос на **рис. 5.2.3** может всасывать находящуюся под низким давлением воду из пруда и наполнять шланг водой под высоким давлением. Если другой конец шланга открыт, вода будет ускоряться в направлении более низкого давления на открытом конце и на выходе из шланга будет обладать значительной кинетической энергией. Откуда же берется эта энергия?

Ответ: из ваших усилий и из работы насоса. Когда вы нажимаете на поршень, сжимая воду и проталкивая ее через верхний клапан, вы совершаете над водой работу, поскольку действуете на ее поверхность направленной внутрь силой, и вода движется в этом же направлении. Количество совершаемой вами работы равно произведению давления воды на объем перекачиваемой воды. Это простое соотношение между работой, давлением и объемом следует из того, что направленная внутрь сила, которую вы прилагаете к воде посредством поршня, равна произведению давления воды на площадь поверхности поршня, а расстояние, которое проходит вода по направлению движения силы, равно объему перекачиваемой воды, деленному на площадь поверхности поршня. Ну а сила, умноженная на расстояние, равна работе.

По мере того как вы качаете воду, она разбрызгивается из открытого конца шланга. Энергия, которая заставляет воду ускоряться при выходе из шланга, передается через воду непосредственно от насоса. Поскольку вода несжимаема, то каждый раз, когда литр воды поступает в шланг из насоса, литр воды и выливается из шланга. Вода не запасает никакой энергии, это насос передает каждому литру воды определенное количество энергии на выходе из шланга. Поэтому нам кажется, что эта энергия связана с водой, а не с насосом. Сейчас мы вводим полезную величину: потенциальную энергию давления. Вода, которая находится под давлением, имеет потенциальную энергию давления, равную произведению объема воды на ее давление.

Поскольку потенциальная энергия давления на самом деле поступает от насоса, она исчезает, как только разрывается связь между водой и насосом; вы не можете сохранить в каком-нибудь сосуде воду под давлением и ожидать, что она сбережет эту потенциальную энергию. Концепция потенциальной энергии давления имеет смысл, только если вода свободно течет, то есть вода, вытекающая из трубы (шланга), немедленно замещается в трубе следующей порцией воды. В этом случае энергия, уходящая из трубы в виде кинетической энергии воды, вновь поступает в трубу от насоса. Собственно говоря, эти подробности действия насоса не так важны, как та идея, что вода, которая движется по трубе, немедленно замещается следующей порцией воды под таким же давлением. Пока сохраняется равномерное течение воды, вы можете спокойно пользоваться понятием потенциальной энергии давления, даже если не знаете, где установлен насос и есть ли он вообще.

Потенциальная энергия давления наиболее важна для стационарного потока — так называется непрерывное течение жидкости с постоянной скоростью в неподвижной среде, без запуска, остановки или других изменений параметров потока в любой точке. Вы можете сказать, что наблюдаете стационарный поток, если вы не можете уловить ход времени в жидкости или ее окружении; видео потока будет выглядеть точно так же, как стоп-кадр. С небольшими скидками на погрешности, неизбежные в реальной жизни, равномерное распыление воды из шланга, ветерок, равномерно обдувающий ваше неподвижное лицо, медленное течение спокойной реки — все это примеры стационарного потока.

Без учета силы тяжести энергия некоторого объема воды в стационарном потоке равна сумме его потенциальной энергии давления и его кинетической энергии. Мы уже знаем, что потенциальная энергия давления равна произведению объема воды на ее давление. Кинетическая энергия воды, согласно формуле 5.2.1, равна половине произведения ее массы на квадрат скорости. Учитывая, что масса воды равна произведению ее плотности на объем, суммарная энергия составит:

$$\begin{aligned} \text{энергия} &= \text{потенциальная энергия давления} + \text{кинетическая энергия} = \\ &= \text{давление} \times \text{объем} + 1/2 \times \text{плотность} \times \text{объем} \times \text{скорость}^2 \end{aligned} \quad (5.2.1)$$

Если мы разделим все члены этого уравнения на объем, то получим его в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{\text{энергия}}{\text{объем}} &= \frac{\text{потенциальная энергия давления}}{\text{объем}} + \frac{\text{кинетическая энергия}}{\text{объем}} = \\ &= \text{давление} + 1/2 \times \text{плотность} \times \text{скорость}^2 \end{aligned} \quad (5.2.2)$$

По мере того как определенный объем воды перемещается, он тут же заменяется новым объемом, движущимся в точности таким же образом. Поскольку поток стационарный, энергия этого нового объема воды должна быть равна энергии предыдущего объема; таким образом, энергия каждого из равных объемов воды, перемещающихся вдоль определенного пути, должна быть равной. Путь, который проходит определенный объем воды, называется линией тока, и энергия, приходящаяся на единицу объема воды вдоль линии тока, является величиной постоянной:

$$\begin{aligned} \frac{\text{энергия}}{\text{объем}} &= \frac{\text{потенциальная энергия давления}}{\text{объем}} + \frac{\text{кинетическая энергия}}{\text{объем}} = \\ &= \text{давление} + 1/2 \times \text{плотность} \times \text{скорость}^2 = \text{постоянная величина (вдоль линии тока)} \end{aligned} \quad (5.2.3)$$

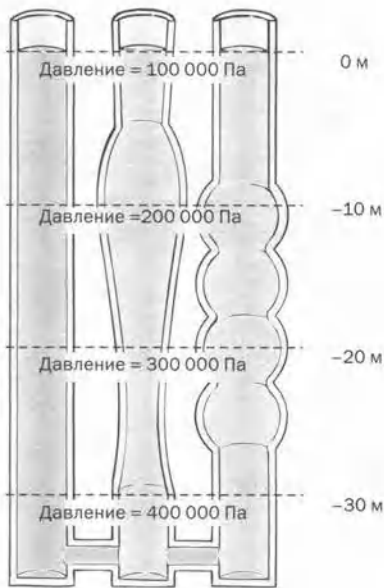
Уравнение 5.2.3 называют уравнением Бернулли в честь швейцарского математика Даниила Бернулли (см. ❶), чьи труды проложили путь к открытию этого закона, хотя фактически сформулировал его другой швейцарский математик — Леонард Эйлер (1707–1783).

Благодаря постоянству энергии несжимаемая жидкость, например вода, при движении в стационарном потоке вдоль линии тока может увеличивать давление за счет скорости и наоборот. При разбрызгивании воды из шланга с насадкой, например, ее давление падает, но скорость возрастает; происходит преобразование потенциальной энергии давления в кинетическую энергию. А когда эти струи воды попадают на

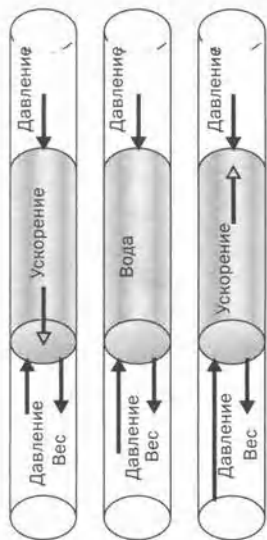


**Рис. 5.2.3.** Поршневой насос перекачивает воду из области низкого давления в область высокого давления. (а) Когда поршень движется наружу, вода поступает в цилиндр из области низкого давления. (б) Когда поршень движется внутрь, проточный клапан закрывается и вода поступает из цилиндра в область высокого давления.

❶ Швейцарский математик Даниил Бернулли (1700–1782), будучи профессором Базельского университета, преподавал не только физику, но также ботанику, анатомию и физиологию. Он правильно догадался, что давление газа на стенки сосуда связано с действием бесчисленных мельчайших частиц, из которых состоит газ. Он также вывел важное соотношение между давлением, скоростью и высотой, на которой находится жидкость, известное сегодня как уравнение, или теорема Бернулли.



**Рис. 5.2.4.** Давление покоящейся воды в трубах возрастает примерно на 10 000 Па на каждый метр глубины. Форма труб не имеет значения. Для сообщающихся труб, открытых сверху и соединенных снизу, как показано на рисунке, вода будет, как правило, перетекать из одной части в другую, пока во всей системе не установится один и тот же уровень жидкости.



**Рис. 5.2.5.** В вертикальной трубе сила тяжести влияет на движение воды. (а) Если бы давление воды не менялось с глубиной, вода приобретала бы направленное вниз ускорение (т. е. падала бы) под действием собственного веса. (б) Если давление воды увеличивается с глубиной на 10 000 Па/м, вода не ускоряется. (в) Если давление воды увеличивается с глубиной больше, чем на эту величину, вода приобретает направленное вверх ускорение.

машину, которую вы моете, скорость уменьшается, но давление увеличивается; происходит преобразование кинетической энергии обратно в потенциальную энергию давления. В обоих случаях полная энергия воды является постоянной величиной.

## Сила тяжести и давление воды

Сила тяжести создает в воде градиент давления: чем глубже, тем больше вес воды сверху и тем больше давление. Поскольку вода гораздо плотнее воздуха, давление воды гораздо сильнее увеличивается с глубиной. В вертикальной открытой сверху трубе вода на поверхности имеет атмосферное давление (около 100 000 Па), но уже на глубине 10 м (33 футов) давление в трубе возрастает в два раза — до 200 000 Па. На этой сравнительно небольшой глубине десятиметровая толща воды в трубе весит столько же, сколько и весь атмосферный столб (аналогичного сечения) высотой в несколько километров.

Форма трубы не влияет на соотношение между давлением и глубиной. Независимо от сложности системы, давление покоящейся воды в ней возрастает на 10 000 Па на метр глубины или 10 000 Па/м (**рис 5.2.4**). Этот постоянный градиент давления создает направленную вверх выталкивающую силу, которая действует на любое тело, погруженное в воду. Фактически эта выталкивающая сила поддерживает саму воду (**рис. 5.2.5**).

Зависимость давления воды от глубины имеет ряд важных следствий для систем водоснабжения. Во-первых, давление воды в нижней части высокой трубы существенно выше, чем в верхней части этой же трубы. Следовательно, если вода в небоскреб подается по единственной трубе, то давление воды на первом этаже будет опасно высоким, в то время в пентхаусе давления хватит разве что на жиденький душ. Поэтому в высотных зданиях приходится особенно тщательно рассчитывать давление воды; не получится просто подать воду на все этажи небоскреба из одной и той же трубы.

Во-вторых, давление в городском магистральном водоводе не только придает ускорение льющейся из крана воде; оно также поддерживает воду в трубах многоэтажных зданий. Подъем воды на третий этаж против направленной вниз силы тяжести требует большой направленной вверх силы, которая и обеспечивается давлением воды. Чем выше вы хотите поднять воду, тем большее давление воды необходимо предусмотреть в нижней части водопроводной системы. Для подъема воды также требуется энергия, которую чаще всего поставляют водяные насосы.

В-третьих, когда вода движется вверх и вниз по холмам и низинам города, ее давление изменяется соответственно высоте. В низине давление может быть очень высоким, на вершине холма — низким. Поэтому магистральные водоводы в низинных участках должны быть особенно прочными во избежание аварии. Однако высокое давление в низинах играет и положительную роль: оно помогает поднимать воду из низин на возвышенности (**рис. 5.2.6**). Тем не менее города, расположенные в горной или холмистой местности, нуждаются в разветвленной сети насосных станций и других систем регулировки давления. Иначе не обеспечить нужное давление для всех зданий, независимо от их местоположения и высоты.

Однако водопровод даже самого холмистого города включает в себя участки стационарного потока, которые можно рассчитать, используя версию уравнения Бернулли с учетом гравитации. Но прежде чем мы этим займемся, давайте рассмотрим нестационарный поток — именно такие потоки наблюдаются в изолированных участках водопровода с открытыми каналами, где вода движется вверх или вниз и мы можем наблюдать, как меняется картина ее движения.

Простейший случай — открытый водопровод, где вся открытая поверхность воды находится под атмосферным давлением. Как и любое тело, вода приобретает ускорение в направлении, которое максимально снижает ее общую потенциальную энергию. Поскольку ни неподвижные желоба, поддерживающие воду снизу, ни неизменное атмосферное давление воздуха над водой не вносят вклад в потенциальную энергию, вся потенциальная энергия воды определяется силой тяжести и вода ускоряется в направлении, вдоль которого быстрее всего уменьшается гравитационный потенциал.

Если открытая поверхность воды в одном месте выше, чем в другом, то уменьшается средняя высота и, соответственно, гравитационная потенциальная энер-



гия. В результате вода с более высоких участков перетекает в более низкие. Через некоторое время вода успокаивается и приходит в состояние устойчивого равновесия — все открытые поверхности спокойны и снова располагаются на одной и той же высоте. Независимо от сложности водопроводной системы, открытая (не закованная в трубу) вода всегда “найдет свой уровень”. Естественное течение часто используется в водопроводных системах (см. ❷).

Но если изолировать участок системы и уменьшить давление над одной из открытых поверхностей воды, то эта поверхность поднимется выше остальных. Ее уровень будет расти до тех пор, пока дополнительное давление, обусловленное большей высотой столба воды, не скомпенсирует недостающее давление над открытой поверхностью. Чем меньше давление над этой поверхностью, тем выше должна подняться вода, чтобы восполнить недостающее давление. Благодаря этому явлению мы можем пить через соломинку, благодаря ему же вода может при помощи устройства, которое называется сифон, перетекать из одного открытого сосуда в другой, чтобы уравнивать высоту поверхности (рис. 5.2.7).

Однако если даже полностью устранить давление воздуха на участке открытой поверхности воды (скажем, вставив в воду очень длинную соломинку, откачав из нее воздух), то вода все равно поднимется лишь примерно на 10 м выше поверхности в этом открытом резервуаре. Даже при полном отсутствии воздушного давления над ним этот десятиметровый столб воды собственным давлением полностью заменит отсутствующее давление воздуха и, таким образом, не даст воде в остальных частях системы подняться выше этого уровня. Вот почему вы не можете извлечь воду из глубокого колодца, просто погрузив туда трубу и понизив в ней давление: вода поднимется не более чем на 10 м. Вместо этого вам придется в нижней части трубы установить насос, который будет нагнетать давление и заставлять воду подниматься на всю высоту трубы.

## Еще о транспортировке воды: гравитация

Для того чтобы поднять воду на третий этаж, нужны, как мы уже видели, давление и энергия. Теперь мы можем расширить закон о постоянстве энергии в стационарном потоке жидкости, включив в него гравитацию и гравитационную потенциальную энергию.

Гравитационная потенциальная энергия воды равна ее весу, умноженному на высоту (то есть произведению силы, необходимой, чтобы поднять данный объем воды, на расстояние, на которое его нужно поднять). Удельная гравитационная потенциальная энергия (приходящаяся на единицу объема), соответственно, равна произведению удельного веса на высоту. Поскольку удельный вес равен плотности, умноженной на ускорение свободного падения, удельная гравитационная потенциальная энергия равна произведению трех величин: плотности, ускорения свободного падения и высоты. Если включить в уравнение 5.2.2 (с. 159) гравитационную потенциальную энергию и учесть, что для стационарного потока, движущегося вдоль линии тока, удельная энергия есть величина постоянная, получим следующее соотношение:

$$\frac{\text{энергия}}{\text{объем}} = \frac{\text{потенциальная энергия давления}}{\text{объем}} + \frac{\text{кинетическая энергия}}{\text{объем}} + \frac{\text{гравитационная потенциальная энергия}}{\text{объем}}$$

$$= \text{давление} + 1/2 \times \text{плотность} \times \text{скорость}^2 + \text{плотность} \times \text{ускорение свободного падения} \times \text{высота} = \text{постоянная величина (вдоль линии тока)} \quad (5.2.4)$$

Это расширенный вариант уравнения Бернулли, который учитывает силу тяжести. Уравнение 5.2.4 корректно описывает движение стационарного потока вдоль линии тока с переменной высотой.

### Уравнение Бернулли

Для несжимаемой жидкости в стационарном потоке сумма его потенциальной энергии давления, кинетической энергии и гравитационной потенциальной энергии постоянна вдоль линии тока. Уравнение 5.2.4 является математическим выражением этого закона.

❷ Римляне использовали силу тяжести, чтобы доставлять в Рим воду из источников, находящихся на расстоянии до 90 км от города. Очень плавный уклон акведуков позволял воде непрерывно двигаться, несмотря на силы сопротивления. В качестве материала для труб в римском водопроводе широко использовался свинец, и это дало некоторым историкам основание предположить, что постоянное и массовое свинцовое отравление внесло свой вклад в упадок Римской империи.



Рис. 5.2.6. Лос-Анджелес получает большую часть воды из долины Оуэнс, находящейся в 300 км севернее города. Вода самотеком прокладывает путь между горами и долинами исключительно под действием силы тяжести. Давление в огромных трубах повышается на спусках и затем используется, чтобы поднять воду на подъемах. На некоторых участках конструкции построенного в 1913 г. акведука должны выдерживать настолько высокое давление, что стенки труб имеют толщину более одного дюйма (2,54 см).



Рис. 5.2.7. Два открытых сосуда с водой соединены сифоном. Вода течет через U-образную трубку, пока ее уровень в обоих сосудах не становится одинаковым. Благодаря жесткости трубки давление воды в сифоне может опускаться ниже атмосферного.



**Рис. 5.2.8.** Водонапорная башня, используя вес воды, создает высокое давление воды на уровне земли. Чем выше башня, тем больше давление в ее нижней части. Водонапорная башня в состоянии пассивно поддерживать давление воды и не требует постоянной подкачки. Даже в часы максимального водопотребления в сети сохраняется устойчивое давление. Когда уровень воды в башне падает ниже определенной отметки, насос вновь наполняет башню.

Энергия, запасенная в воде, находящейся на определенной высоте, служит для выработки гидроэлектроэнергии. Падающая с высоты вода совершает работу над вращающейся турбиной, которая, в свою очередь, совершает работу над электрическим генератором. Таким образом, гравитационная потенциальная энергия воды преобразуется в электрическую энергию. Чем больше воды и чем с большей высоты она падает, тем больше электроэнергии может выработать гидроэлектростанция.

Поскольку суммарная энергия постоянна, то для несжимаемой жидкости (в том числе и воды), движущейся в стационарном потоке, соотношение между ее составляющими — энергиями, связанными со скоростью, давлением и высотой, — может меняться. Таким образом, когда вода течет вниз, ее скорость, или давление, или оба эти параметра увеличиваются; если она вытекает из открытого крана, увеличивается скорость; наконец, если вода непрерывно течет под уклон в заполненной трубе, растет давление; а когда вода течет вверх, все наоборот. Вода, бьющая вверх из фонтана, при подъеме теряет скорость, а вода, стационарно текущая вверх по заполненной трубе, теряет давление.

Благодаря этой взаимосвязи между высотой, давлением и скоростью можно поддерживать давление в водопроводной системе, соединив систему труб с каким-нибудь очень высоким столбом воды. Именно для этого в населенных пунктах, городских районах и даже в некоторых отдельных зданиях установлены водонапорные башни. Такие башни ставят на относительно высоком месте посреди района, который они должны обслуживать. Резервуар в верхней части водонапорной башни заполняют водой при помощи насоса, после чего постоянное высокое давление во всей подключенной к башне системе труб поддерживается за счет силы тяжести этой воды (рис. 5.2.8). В верхней, открытой части водонапорной башни вода находится под атмосферным давлением, но в нижней части давление гораздо выше; например, в основании 50-метровой башни давление равно приблизительно 600 000 Па, то есть 6 атмосфер.

Водонапорная башня не только обеспечивает в водопроводной сети достаточно устойчивое давление; она также успешно хранит энергию и может быстро ее доставлять (см. 3). Когда вода выходит из водонапорной башни, ее гравитационная потенциальная энергия в верхней части преобразуется в потенциальную энергию давления в нижней. Водонапорная башня заменяет насос, обеспечивая постоянный приток воды при почти постоянном высоком давлении. Но, в отличие от насоса, водонапорная башня может подавать воду высокого давления в огромных количествах. Пока уровень воды в башне не упадет слишком низко, вода под высоким давлением будет поступать в сеть.

Поскольку вода, выйдя из стоящей на холме водонапорной башни, продолжает течь под уклон к домам потребителей, ее давление может стать даже чересчур высоким. Чтобы это давление выдержали трубы и батареи водяного отопления, его нужно уменьшить. Для этого применяются регулирующие устройства, использующие явления, похожие на трение и связанные с преобразованием потенциальной энергии давления воды в тепловую энергию. Эти явления мы рассмотрим в следующей главе.

Благодаря водонапорной башне водопроводная сеть может поддерживать давление без постоянно работающего водяного насоса. Поскольку водяной насос из-за трения превращает упорядоченную энергию в тепловую, даже когда через него не идет вода, наиболее энергоэффективный режим работы насоса — прокачивать как можно больше воды. Можно сэкономить и упорядоченную энергию, и деньги, если насос заполняет водонапорную башню в ночное время: в эти часы электроэнергия дешевле, и насос может работать на полную мощность, то есть с максимальной эффективностью. Затем в течение дня, по мере расходования воды потребителями, уровень воды в башне постепенно падает. Если уровень воды в башне падает слишком низко и давление в водопроводной сети снижается ниже допустимого, насос включается и снова наполняет резервуар башни.

Если насос поддерживает давление воды, то он обеспечивает и потенциальную энергию давления. Однако насос имеет ограниченную мощность (как правило, измеряемую в лошадиных силах), и в каждую секунду он не может передавать воде больше определенного количества энергии. Если вода достаточно медленно отводится от насоса, она может оставаться под достаточно высоким давлением. Но если на пути ее движения открыть сразу слишком много кранов, максимальная мощность насоса будет превышена и насос будет подавать большое количество воды, но под более низким давлением. Так как люди, как правило, используют воду по определенному ежедневному графику — утром принимают душ, вечером моют посуду, — то в тех водопроводных сетях, в которые вода нагнетается только насосами, давление воды может периодически существенно падать.

Включение в систему водоснабжения водонапорной башни почти устраняет опасность таких падений давления. (Поддерживать давление воды можно также при помощи сжатого воздуха — см. ❸.)

Подача воды в небоскреб представляет собой серьезную техническую проблему. Чтобы поднять воду с уровня земли до самого верхнего этажа “в один прием”, требуется совершенно немыслимое давление, которое не сможет обеспечить обычная водопроводная сеть. Вместо этого в небоскребах устанавливают систему насосов, которые подают воду снизу вверх в несколько этапов. Фактически для поддержания устойчивого давления воды внутри небоскреба устроены собственные водонапорные башни. Эти внутренние резервуары также имеют важное значение для пожарной безопасности, особенно в условиях отключения электроэнергии. Никакая пожарная машина не способна подать воду на верхние этажи небоскреба, зато пожарные могут использовать ту воду, которая уже хранится в резервуарах здания.

## СОЛОМИНКИ ДЛЯ ПИТЬЯ

Если вставить в стакан с водой открытую на верхнем конце трубочку, то вода в ней поднимется до уровня окружающей жидкости. Но если вы обхватите соломинку губами и всосете воздух, вода с ускорением устремится вам в рот. Удаляя из соломинки воздух, вы фактически уменьшаете давление над водой. Оно становится меньше атмосферного, и тогда вода с ускорением движется в область более низкого давления. И хотя вам кажется, будто это вы втягиваете воду, на самом деле вы просто позволяете давлению воды в стакане толкать воду в сторону вашего рта.

Вода на поверхности стакана имеет атмосферное давление; таким образом, она может поддерживать либо вес находящегося над ней воздуха, либо вес десятиметрового столба воды, но никак не то и другое одновременно. Удаляя находившийся над водой воздух, вы позволяете ей поддерживать столб воды вместо столба воздуха. Но при атмосферном давлении максимальная высота этого столба составляет 10 м. При попытке втянуть в рот воду через соломинку длиной 11 м, направленную вертикально вниз, вас постигнет неудача — вода не дойдет до вашего рта. Даже если удалить из трубочки полностью весь воздух (чего вы на самом деле не сможете сделать), атмосферное давление поднимет воду только на высоту 10 м.

Точно так же водяной насос не может поднять воду из артезианской скважины, если будет находиться на высоте более 10 м от уровня воды в скважине. Именно поэтому большинство насосов обычно устанавливают внутри скважины, в толще воды. Обусловленное силой тяжести давление воды направляет воду в погружной насос, который затем обеспечивает необходимое для подъема воды высокое давление.

## ПЛАВАНИЕ С АКВАЛАНГОМ

Давайте вообразим, будто вы наслаждаетесь отпуском на Багамских островах. Вы провели утро, лениво плескаясь в океанских волнах. Утомившись от горячего солнца и насладившись великолепными пейзажами, вы решили теперь изучить морские глубины. Вы покупаете очень-очень длинную коктейльную трубочку, привязываете к поясу камень и опускаетесь на глубину 10 м на песчаное дно. Вы пытаетесь дышать через трубочку и вдруг обнаруживаете, что у вас ничего не получается. К счастью, вы хорошо умеете распутывать узлы... Как же именно мы вдыхаем воздух и почему это так трудно сделать под водой?

Мы вдыхаем, увеличивая объем легких при помощи мышц груди и диафрагмы. Когда легкие расширяются, находившийся внутри них воздух заполняет больший объем, поэтому уменьшаются его плотность и давление. Наружный воздух, находящийся под атмосферным давлением, начинает с ускорением двигаться в область низкого давления внутри легких — и легкие наполняются воздухом. Когда мы выдыхаем, то при помощи мышц сокращаем объем легких, воздух внутри них сжимается, его плотность и давление увеличиваются. Более высокое давление внутри легких гонит воздух в сторону более низкого наружного давления — легкие освобождаются от воздуха.

Этот механизм работает до тех пор, пока давление в окружающей среде близко к давлению внутри грудной клетки. В этом случае можно при помощи минимальных усилий изменять давление в легких: делать его выше или ниже наружного давления,

❹ Струя воды, вылетающая из водяного пистолета, в некоторых моделях этой игрушки ускоряется при помощи сжатого воздуха. Небольшой ручной насос нагнетает воздух под давлением в резервуар с водой — этот процесс требует совершения работы. При нажатии на спусковой крючок дисбаланс давления вызывает ускорение воды, которая вылетает из дула тонкой сильной струей. Накопленная энергия превращается в кинетическую энергию воды. По мере выхода воды из резервуара воздух постепенно расширяется и его накопленная энергия уменьшается.

чтобы воздух входил в легкие и выходил из них — словом, чтобы вы дышали. Но когда вы, находясь под водой на глубине 10 м, пытаетесь дышать воздухом под атмосферным давлением, у вас возникают трудности: оказывается, вы можете только выдохнуть!

На глубине десяти метров под водой давление на вашу грудную клетку в два раза выше, чем на поверхности. Оно сжимает воздух в легких так, чтобы его плотность и давление тоже увеличились в два раза. Плывая под водой, вы можете не сразу ощутить сжатие, которому подвергнуты ваши легкие, но если прислушаться к другим органам, и прежде всего к ушам, вы наверняка заметите это сжатие.

К сожалению, воздух в трубочке не поддерживает никакого веса воды и воздух в нем по-прежнему находится под атмосферным давлением. Учитывая, что давление воздуха в ваших легких сейчас в два раза выше, легко понять, что воздух через трубочку может течь только из легких, но уж никак в них. Поскольку ваши мышцы недостаточно сильны, чтобы расширить ваши легкие и уменьшить давление внутри так, чтобы оно стало ниже атмосферного, вы не можете вдохнуть. Вы можете только выдохнуть.

Для того чтобы можно было дышать глубоко под водой, поступающий в рот воздух должен быть сжат так, чтобы его давление примерно равнялось бы давлению воды на грудную клетку. Если вы находитесь на глубине 10 м, то давление воздуха, которым вы дышите, должно быть примерно в два раза выше атмосферного (то есть 2 атм). На глубине 100 м давление воздуха должно составлять уже около одиннадцати атмосфер. Этот сжатый воздух можно либо подавать по трубе с поверхности, как это когда-то делали при глубоководных водолазных погружениях, либо вы можете взять его с собой в баллоне акваланга.

Задача акваланга — подавать вам воздух под давлением, близким к давлению среды вокруг вас. Специальный регулятор контролирует, чтобы давление подаваемого воздуха было равно давлению воды, окружающей дайвера. Когда вы при помощи мышц груди и диафрагмы расширяете легкие, сжатый воздух легко может проникнуть внутрь. Вы выдыхаете, сокращая объем легких и выталкивая воздух в воду в виде пузырьков.

В аквалангах воздух хранится в стальных баллонах, которые способны выдержать огромное давление. Молекулы воздуха в баллоне упакованы так плотно, что каждый баллон может обеспечить много минут и даже часов дыхания. Поскольку плотность воздуха в баллоне огромна, его давление также очень велико — обычно около 200 атмосфер (примерно 20 000 000 Па). Но когда воздух выходит из баллона, его давление понижается при помощи специального регулятора. Этот регулятор давления выпускает небольшую порцию воздуха высокой плотности в отдельную емкость, где этот воздух расширяется и становится менее плотным. Этим воздухом вы и дышите, используя для этого шланг и загубник.

Регулятор давления должен определить, сколько молекул воздуха нужно передать в отдельную емкость. Если давление окажется слишком низким, вы не сможете дышать, если чересчур высоким — вы можете лопнуть, как воздушный шар. Настройка давления — сложная задача, для которой придумано остроумное решение.

Регулятор сравнивает давление в загубнике с давлением воды. Чтобы управлять потоком воздуха, поступающим из баллона в шланг с загубником, регулятор использует гибкую мембрану (рис. 5.2.9). Когда по одну сторону мембраны находится вода, а по другую — воздух, то результирующая сила, действующая на мембрану, будет равна нулю, только когда давление на нее с обеих сторон будет совершенно одинаковым.

Если давление в загубнике слишком низкое, на мембрану действует результирующая сила, которая открывает клапан-регулятор, и в загубник начинает поступать больше воздуха из баллона. Когда давление воздуха в загубнике уравновешивается с давлением воды, на мембрану перестает действовать результирующая сила и клапан закрывается. По мере того как вы вдыхаете воздух из загубника, регулятор пропускает в него следующие порции воздуха из баллона, чтобы давление воздуха в загубнике всегда было как можно более близким к давлению воды.

На самом деле, в устройствах для подводного плавания применяется двухступенчатая система регулирования давления. На первом этапе давление понижается от очень высоких значений в баллоне до средних (примерно 10 атм), на второй — понижается еще больше и доводится до давления окружающей среды.

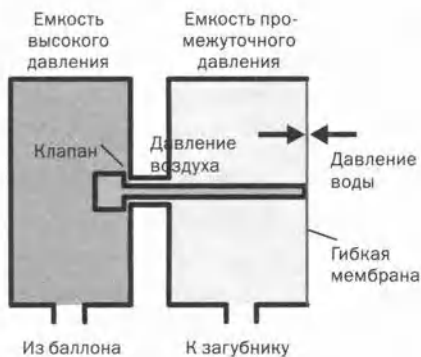


Рис. 5.2.9. Регулятор давления в снаряжении для дайвинга включает клапан и чувствительную к давлению мембрану, при помощи которых контролируется поток воздуха высокого давления из баллона к загубнику дайвера. Если давление в загубнике слишком низкое, мембрана открывает клапан, чтобы увеличить подачу воздуха в загубник. В результате увеличивается давление в загубнике. Когда оно становится равно внешнему давлению воды, мембрана закрывает клапан, тем самым прекращая подачу воздуха.

Первая ступень необходима, потому что второй регулятор не очень хорошо работает, если в него поступает воздух с чересчур высоким давлением.

В то время как второй регулятор сравнивает давление воздуха на выходе с давлением воды, регулятор первой ступени сравнивает выходное давление воздуха с некоей заданной величиной, которая контролируется пружиной. Воздух, выходящий из первой ступени регулятора, давит на мембрану с одной стороны, в то время как с другой сторону на эту же мембрану давит пружина. Если давление воздуха ниже, чем сила пружины, регулятор первой ступени увеличивает проходящий через него поток воздуха.

Если же давление воздуха становится слишком высоким, регулятор первой ступени приостанавливает поток воздуха. Пружинные регуляторы давления обычно используются и в баллонах с пропаном, которые используют для отопления домов и приготовления пищи, и в баллонах с углекислым газом для автоматов газированных напитков. Эти регуляторы обеспечивают подачу газа с постоянным заданным давлением, значительно более низким, чем давление в самом баллоне.

Чем глубже опускается дайвер, тем более высокое давление должен обеспечивать регулятор, чтобы пловец мог дышать. Это повышение давления имеет несколько последствий. Во-первых, поскольку плотность воздуха повышается пропорционально давлению, регулятор должен поставлять для каждого вдоха все больше воздушных частиц. Поскольку в баллоне содержится определенное количество этих частиц, расход воздуха на больших глубинах выше, чем на малых. Чем глубже ныряет дайвер, тем скорее истощится его запас воздуха.

Во-вторых, возросшая плотность воздуха влияет на его текучесть. При обычной плотности на уровне моря воздух без труда проникает в легкие — мы практически этого не замечаем. Но при давлении в 10 раз больше воздух становится заметнее более плотным и процесс дыхания затрудняется.

В-третьих, давление влияет на растворимость воздуха в воде, не говоря уже о крови и тканях организма. При растворении газа его молекулы равномерно распределяются между молекулами воды. Концентрация растворенного воздуха зависит от соотношения количества частиц, входящих в воду и выходящих из нее. Все, что способствует вхождению в воду, повышает концентрацию растворенных частиц, и наоборот. Повышение давления воздуха, например, увеличивает его плотность и долю частиц, попадающих в воду; концентрация растворенного воздуха начинает повышаться. Но увеличение концентрации растворенного воздуха не может продолжаться бесконечно. По мере того как все больше частиц входит в раствор, увеличивается доля тех частиц, которые выходят из раствора. Система стремится достичь равновесия — то есть состояния, когда в воду будет входить столько же частиц воздуха, сколько выходит из нее. Таким образом, концентрация становится постоянной. В состоянии равновесия концентрация растворенных частиц воздуха примерно пропорциональна его плотности, хотя она также зависит от температуры и от того, насколько крепко связаны между собой молекулы конкретного газа (из входящих в состав воздуха) и молекулы воды в растворе.

Молекулы газов, которые образуют с молекулами воды прочные связи (например, углекислого газа), хорошо растворимы, то есть характеризуются достаточно высокими равновесными концентрациями (см. 5). Однако молекулы газов, образующие лишь слабые связи с молекулами воды (например, азота), растворяются гораздо хуже. Тем не менее при достаточно высокой плотности воздуха даже азот умеренно растворяется в воде и достигает заметной концентрации.

Когда аквалангист находится на большой глубине и дышит плотным воздухом под высоким давлением, в его крови и тканях растворяется значительное количество азота. Когда аквалангист начинает всплывать, снижение давления влечет за собой выход молекул азота из раствора. Если дайвер поднимается слишком быстро и давление падает резко, пузырьки газообразного азота начинают формироваться непосредственно в крови и тканях ныряльщика (примерно то же самое происходит в бутылке газировки, когда вы открываете ее). И если из кровеносной системы пузырьки азота быстро выводятся, то пузырьки, образующиеся в тканях, исчезают гораздо медленнее, и дайвер испытывает приступ кессонной (или декомпрессионной) болезни.

5 Газированные напитки получают, насыщая воду углекислым газом под высоким, в несколько атмосфер, давлением. Углекислый газ по сравнению с другими газами особенно хорошо растворяется в воде, потому что молекулы углекислого газа взаимодействуют с молекулами воды. Соединяясь, они образуют угольную кислоту — химическое вещество, которое и придает вкус газированным напиткам. Но, несмотря на прекрасную растворимость, углекислый газ начинает выходить из раствора всякий раз, когда падение давления нарушает равновесие между количеством входящих и выходящих из раствора молекул. Когда вы открываете бутылку газировки и сбрасываете давление, плотность газообразного диоксида углерода резко падает. Внезапно создается ситуация, когда гораздо больше молекул углекислого газа выходит из воды, чем входит в нее, и из напитка начинается выделяться газ. Если в бутылке есть дефекты и вы ее к тому же встряхнете, молекулы углекислого газа в растворе объединяются и формируют пузырьки. Когда эти пузырьки начинают всплывать к поверхности, напиток «шипит». Восполнить эту потерю растворенного углекислого газа можно единственным способом — заново насытить жидкость углекислым газом под давлением. Эта процедура будет увеличивать долю молекул диоксида углерода, входящих в воду. Таким образом восстановится равновесие между количеством входящих и выходящих молекул. Создание избыточного давления при помощи обычного воздуха не поможет, хотя на рынке есть много устройств, производители которых утверждают обратное.

Чтобы избежать этого, аквалангист должен всплывать медленно, чтобы азот постепенно выходил из раствора и выводился через легкие. Азот медленно проникает в ткани и так же медленно из них выходит, так что дайвер, который долго оставался глубоко под водой, должен потратить много времени, чтобы вернуться на поверхность. Если у вас только один баллон со сжатым воздухом, то вам, как правило, не удастся провести на глубине достаточно долгое время, чтобы возник серьезный риск кессонной болезни. Однако два или три воздушных баллона позволяют совершать длительные погружения, и тогда в тканях образуются повышенные концентрации растворенного азота. Только опытные аквалангисты, умеющие рассчитывать время, которое потребуется на медленное всплытие с постепенным понижением давления, могут без опаски использовать несколько баллонов сжатого воздуха.

На очень больших глубинах в крови растворяется так много азота, что он становится токсичным. Глубоководный ныряльщик должен дышать не воздухом, а газом, содержащим мало или совсем не содержащим азота. Поскольку дышать чистым кислородом опасно, для разбавления кислорода используется гелий. Гелий — инертный газ; он так слабо взаимодействует с другими молекулами, что практически не растворяется в воде, крови и тканях, даже под очень большим давлением.

---

## ГЛАВА 6

# КАК РАБОТАЮТ ПОТОКИ

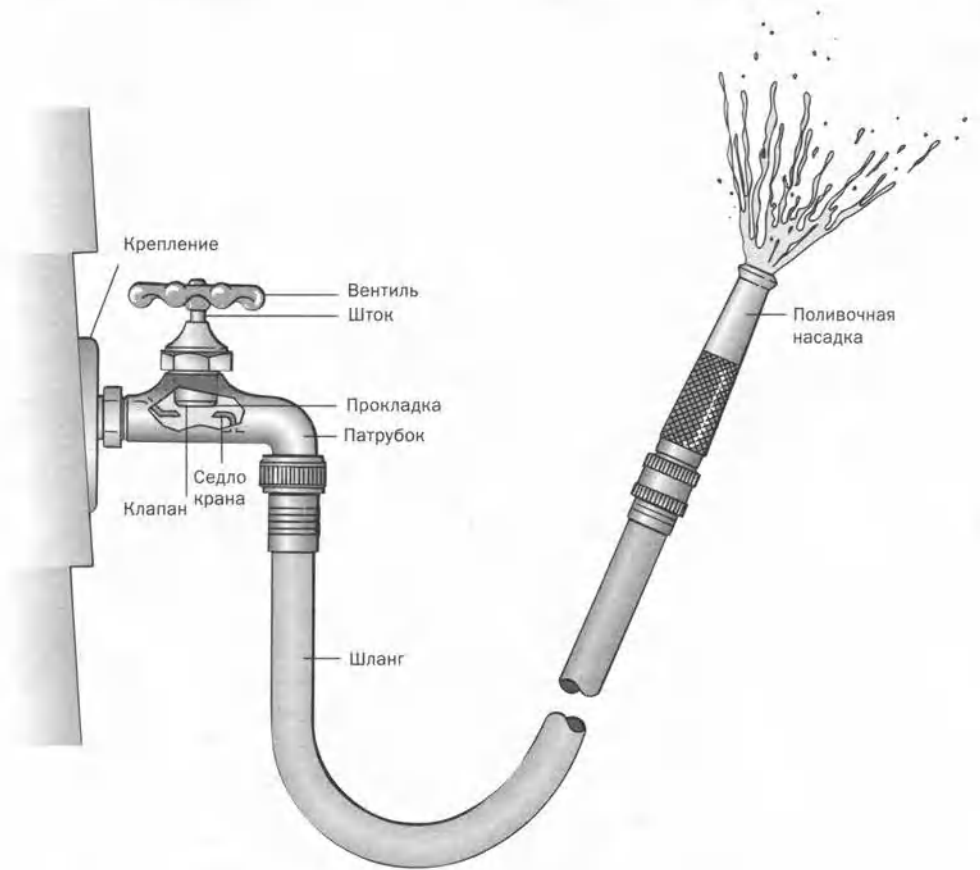
---

**Д**вижение любого потока завораживает. Конечно, неподвижные вода и воздух тоже необходимы для жизни, но уж очень они скучные: разве что давление в них меняется время от времени, да и то в основном благодаря земному притяжению. Куда интереснее бурная река или внезапно налетевший ураган с их бесконечно разнообразными и порой весьма замысловатыми завихрениями. Движение текучей рабочей среды, возможно, не так впечатляет, как ураган на море, но имеет для нас не меньшее значение: ведь нас со всех сторон окружают системы и механизмы, которые приводятся в движение текучими флюидами. В этой главе мы поговорим о различных случаях влияния флюидов на работу тех или иных устройств.

Я не всегда умею вовремя остановиться. Мои дети, задав мне какой-нибудь простой вопрос, терпеливо выслушивают мои пространные ответы — то ли потому, что так же, как и я, считают, что истинное глубокое понимание важнее формального усвоения фактов, то ли потому, что воспитание не позволяет им попросить меня наконец заткнуться. Но взаимоотношения писателя с читателем устроены таким образом, что даже если вы обратитесь ко мне с подобной просьбой, будет поздно — книга-то уже написана. Поэтому я постараюсь сам сдерживать свой пыл. При всей моей любви к флюидам я не буду подробно останавливаться на каждом ручейке, что журчит у вас за домом, и на каждом порыве ветра, который треплет ваш зонтик. Я лучше приберегу этот материал для следующей книги, которая будет называться "Как все работает. Сиквел".

Как вы вскоре увидите, в этой главе мы будем развивать тему сохранения энергии в потоке — тему, которую мы начали обсуждать в главе 5. Кроме того, мы рассмотрим новые силы, которые возникают в потоках, движущихся относительно друг друга и обтекающих твердые тела. Это имеет отношение ко многим видам повседневной деятельности — от мытья окон из шланга до перекачивания воды с помощью ветряного двигателя.

- 168 **6.1 Как правильно полить сад**  
*Каким образом шланг, насадки и краны регулируют расход воды и направляют ее на растения.*
- 178 **6.2 Мяч и воздух**  
*Как воздух воздействует на мяч — и почти на каждый вид спорта.*
- 186 **6.3 Самолеты**  
*Как управление воздушным потоком помогает самолетам летать.*
- 208 **6.4 Пылесосы**  
*Как пылесос использует быстрый поток воздуха для сбора пыли.*



## 6.1 Как правильно полить сад

❶ Двигатель вашего автомобиля защищен моторным маслом, имеющим определенную вязкость. Слишком жидкое масло стечет с трущихся поверхностей и не сможет защитить их, а если масло чересчур густое, двигатель будет тратить лишнюю энергию на перемещение трущихся деталей. Раньше приходилось заменять моторное масло в зависимости от времени года. Летом использовалось более густое масло, которое именно в жару достигало нужной вязкости; зимой заливали более жидкое масло. Современные универсальные масла сохраняют свою вязкость почти на постоянном уровне в широком диапазоне температур и не требуют сезонной замены каждый сезон. В таких смазочных материалах содержатся крошечные цепные молекулы, способные на холоде сворачиваться клубком, а в тепле распрямляться. Эти цепочки повышают вязкость нагретого масла, и оно ведет себя как летнее летом и как зимнее зимой.

Чтобы вырастить цветок, его надо поливать. В прежние времена приходилось таскать по всему саду лейку, но современный водопровод позволяет нам не слишком утруждаться. Подсоединив к крану шланг с насадкой для полива, вы можете выполнить всю работу, практически не вылезая из шезлонга. Однако все эти нехитрые приспособления: краны, шланги и разбрызгиватели — подчиняются далеко не столь простым физическим законам. Именно с помощью законов гидродинамики различные насадки и трубы регулируют расход воды и напор таким образом, чтобы элегантно изогнувшаяся в воздухе струя долетела до самых дальних уголков вашего сада.

### Вязкость воды

В предыдущей главе мы провели в дом воду и теперь можем приступить к поливке сада. Но прежде чем добраться до цветника, вода должна пройти по длинному прямому шлангу, который мы уложили на нашем совершенно ровном участке. Влияет ли длина шланга на подачу воды?

Да, влияет — из длинного шланга вода явно течет хуже, хотя в главе 5 мы выяснили, что в прямой горизонтальной трубе она должна течь равномерно, с постоянной скоростью и при постоянном давлении независимо от длины трубы. Очевидно, в данном случае мы наблюдаем некое очень важное явление, а именно трение. Движение воды в неподвижном шланге не является свободным: вода испытывает действие сил трения, которые мешают ее движению относительно шланга.

Видимо, это весьма необычное трение — ведь большая часть воды в шланге не соприкасается с его стенками... Если вода в глубине потока, вдали от стенок шланга подвергается действию сил, связанных с относительным движением, значит, эти силы должны и возникать где-то в толще воды. Выходит, вода прикладывает силы трения сама к себе!

Вне всяких сомнений, в воде развиваются силы внутреннего трения. Они называются силами вязкого трения и возникают тогда, когда один слой в потоке



скользит вдоль другого слоя того же потока. Вязкость противодействует перемещению слоев относительно друг друга, а как именно это происходит, вы можете наблюдать, если попытаете вылить мед из банки. Мед, находящийся у стенок банки, удерживается там за счет химических сил и остается неподвижным. Но даже на удалении от стенок мед льется с трудом; когда прилегающие слои меда двигаются относительно друг друга, между ними возникает внутреннее трение. Поскольку мед — это густая, вязкая жидкость, именно вязкость не дает всей массе меда течь примерно с одной и той же скоростью. Слои, находящиеся рядом со стенками банки, не движутся, и действие внутреннего трения направлено на то, чтобы помешать движению также и других слоев.

Вода не такая густая, как мед (таб. 6.1.1), поэтому она не так интенсивно сопротивляется относительно движению. Мерой сопротивления относительно движению слоев потока служит вязкость, и вязкость воды меньше вязкости меда. Если же воду подогреть, она станет еще менее вязкой и потечет еще быстрее. Понижение вязкости с ростом температуры, характерное для большинства жидкостей, отражает молекулярную природу внутреннего трения — между молекулами холодной жидкости существуют слабые химические связи, которые как бы склеивают молекулы, и для разрыва этих связей требуется энергия. В горячей жидкости тепловая (внутренняя) энергия молекул больше, поэтому межмолекулярные связи рвутся легче и молекулы получают большую свободу перемещений (см. ❶).

## Поток в прямом шланге; влияние вязкости

Вязкость замедляет течение воды в вашем шланге. Химические по своей природе силы, возникающие между шлангом и внешним слоем воды, не дают этому слою двигаться, а на прилегающий к нему внутренний слой действуют силы внутреннего трения со стороны неподвижного слоя. Этот второй слой замедляет свое движение и действует с силами внутреннего трения на следующий слой. Слой за слоем вязкость тормозит течение воды вплоть до середины потока, пока в целом скорость течения не уменьшится во всем шланге (рис. 6.1.1). Хотя вдоль центра сечения шланга вода движется быстрее, чем в окружающих ее слоях, неподвижный шланг все равно оказывает на нее свое влияние.

Вязкость затрудняет и подачу воды. Вода не может свободно течь по прямому, уложенному горизонтально шлангу сама собой — для этого ей требуется перепад давления. Чтобы сохранить постоянную скорость течения, воду надо толкать по шлангу, как мы толкали шкаф по тротуару в разделе 2.2. И точно так же, как шкаф, вода нагревается, потому что работа, которая совершается ради ее передвижения, превращается в тепловую энергию.

Но в отличие от обычной силы трения скольжения, которая не зависит от относительных скоростей, вязкое трение возрастает вместе с относительными скоростями в массе потока воды. Это происходит потому, что когда два соседних слоя воды начинают перемещаться быстрее, их молекулы сталкиваются одна с другой с большей силой и частотой. Из-за увеличения внутреннего трения быстро текущая вода тратит больше энергии на каждый метр пути, и для того чтобы она могла и дальше течь по шлангу с той же скоростью, необходим более резкий перепад давления, чем при медленном течении.

Из-за влияния вязкости количество воды, протекающей через шланг с постоянной скоростью, зависит от четырех факторов:

- 1 Расход воды обратно пропорционален ее вязкости. Чем выше вязкость, тем труднее воде течь по шлангу.
- 2 Расход воды обратно пропорционален длине шланга. Чем длиннее шланг, тем больше возможностей у сил внутреннего трения замедлить течение воды.
- 3 Расход воды пропорционален разности давлений на входе в шланг и на выходе из него. Этой разностью давлений определяется градиент давления в воде и, следовательно, то, насколько сильно вода проталкивается по шлангу.
- 4 Расход воды пропорционален четвертой степени диаметра шланга. Если диаметр шланга увеличится втрое, то площадь его сечения увеличится в 9 раз и при этом вода вблизи продольной оси шланга будет течь в 9 раз быстрее.

Таблица 6.1.1. Примерная вязкость различных флюидов (см. также ❷)

Флюид	Вязкость*
Гелий (2 К)	0 Па·с
Воздух (20 °С)	0,000183 Па·с
Вода (20 °С)	0,00100 Па·с
Оливковое масло (20 °С)	0,084 Па·с
Шампунь (20 °С)	100 Па·с
Мед (20 °С)	1000 Па·с
Стекло (540 °С)	10 <sup>12</sup> Па·с

\* Паскаль-секунда (сокращенно Па·с, то же, что кг/м·с) — единица измерения вязкости в СИ. Нулевую вязкость имеет только сверхтекучая фаза сильно охлажденного жидкого гелия.

❷ Вода течет легко, мед — с трудом, но их вязкости далеки от экстремальных значений. Вязкость сверхтекучей фазы сильно охлажденного жидкого гелия равна нулю, а вязкость расплавленного стекла чрезвычайно высока. Все прочие жидкости и газы, в том числе воздух, вода, мед и различные шампуни, занимают промежуточное положение. Однако понятие вязкости применимо не ко всем жидкостям. Яичный белок ведет себя самым удивительным образом. Его можно частично вылить из чашки, а потом легким движением руки поймать и водворить обратно в чашку. Это так называемые не-ньютоновские жидкости — кажется, что своим поведением они отрицают законы механики Ньютона в приложениях к потокам. В действительности законы Ньютона не нарушаются, просто в этих веществах развиваются столь сложные внутренние взаимодействия, что зачастую трудно предсказать развитие событий в тех или иных условиях.

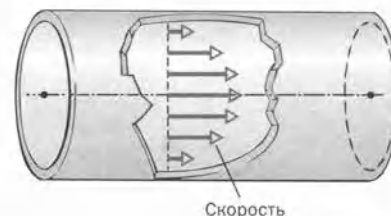


Рис. 6.1.1. Скорость потока воды различна в разных местах сечения трубы. Рядом со стенками вода не движется, а в центре движется быстрее всего. Скорость потока меняется под воздействием внутреннего трения.

Мы можем записать эти зависимости в одном уравнении, если введем необходимый коэффициент  $\pi/128$  — эта непонятная на первый взгляд постоянная была получена путем многотрудных расчетов. Этим уравнением выражается закон Пуазейля:

$$\text{объем} = \frac{\pi \times \text{разница давлений} \times \text{диаметр трубы}^4}{128 \times \text{длина трубы} \times \text{вязкость жидкости}} \quad (6.1.1)$$

### Закон Пуазейля

Объем жидкости, протекающей по трубе за секунду, равен произведению коэффициента  $\pi/128$  на разницу давлений в трубе и на ее диаметр в четвертой степени, деленному на произведение длины трубы на вязкость жидкости.

В зависимости расхода воды от перепада давления, длины трубы и вязкости нет ничего удивительного; мы уже знаем, что, если напор воды слабый, а шланг длинный, ведро наполняется дольше; мы знаем также, что вязкий мед медленнее, чем вода, выливается из бутылки. Но связь расхода воды с диаметром трубы, взятым в четвертой степени, может показаться неожиданной. Тем не менее даже незначительное изменение диаметра шланга существенно отразится на объеме воды, который каждую секунду подается через этот шланг. В США чаще всего пользуются шлангами с диаметрами  $5/8$  и  $3/4$  дюйма, и хотя один отличается от другого всего на 20%, то есть в 1,2 раза, шланг диаметром  $3/4$  дюйма подает в 1,2<sup>4</sup> раза (то есть примерно вдвое) больше воды, чем шланг  $5/8$  дюйма (см. 3 и 4).

Давайте рассмотрим вязкость с точки зрения полной энергии. Вязкость препятствует течению воды по шлангу, то есть силы внутреннего трения совершают отрицательную работу и уменьшают полную энергию воды — ту самую, что входит в уравнение Бернулли (5.2.4), в котором не учитывается тепловая (внутренняя) энергия. Доля оставшейся у воды полной энергии зависит от скорости ее передвижения в шланге. Если вы позволите большому объему воды вытекать из шланга, она будет двигаться быстрее, преодолевая большие силы внутреннего трения. При этом изрядная доля полной энергии воды теряется в виде тепловой энергии, и на выходе из шланга мы получим слабую струю.

Но если вы частично перекроете отверстие шланга (скажем, большим пальцем) и уменьшите поток, течение в шланге замедлится и силы вязкого трения станут меньше. В результате вода сохранит значительную долю своей полной энергии и придет к вашему пальцу под высоким давлением. Проходя сквозь узкую щель между пальцем и краем шланга под высоким давлением, вода разовьет огромную скорость, и брызги полетят во все стороны.

Теперь нам ясно, почему в системах подачи воды, как правило, используются как можно более широкие трубы — настолько широкие, насколько это вообще допускают условия эксплуатации. В противоположность узкому шлангу широкая труба подает большой объем воды при малой скорости ее движения, слабом внутреннем трении и незначительных потерях полной энергии. При такой эффективности системы подачи воды трением можно пренебречь, и закон Бернулли будет адекватно описывать свойства воды на ее пути по шлангу.

### Поток в изогнутом шланге; изменения динамического давления

Предположим, что ваш садовый шланг изгибается вправо и тем самым изгибает поток воды. На повороте вода движется с ускорением, и, как мы видели в главе 5, в ответ на неравномерность давления вода приобретает только горизонтальное ускорение. Поскольку шланг неподвижен, перепады давления внутри него могут быть связаны только с самой водой; вода подвергается воздействию меняющегося динамического давления.

Чтобы лучше понять суть этого явления, давайте проследим за движением потока в изгибе трубы. Хотя мы только что изучили внутреннее трение, для простоты и ясности можем им пренебречь. В длинном шланге внутреннее трение играет большую роль, но на коротком изогнутом участке оно не оказывает существенного влияния на характер потока.

3 Пожарный брандспойт должен подавать много воды под большим напором, поэтому пожарные рукава делают большого диаметра. Заполненный водой под высоким давлением широкий рукав становится жестким и тяжелым, и его трудно удерживать. Иногда в воду добавляют специальные реагенты, которые уменьшают ее вязкость, что позволяет пожарным пользоваться более узкими, легкими и гибкими рукавами.

4 На просторах Аляски нефть приходится транспортировать по нефтепроводам очень большого диаметра. Расстояния велики, а нефть — жидкость вязкая, хотя ее и подогревают, чтобы уменьшить вязкость и облегчить транспортировку.

В отсутствие внутреннего трения полная энергия воды постоянна вдоль каждой линии потока, и обмен энергией происходит только согласно закону Бернулли. Но поскольку шланг лежит на земле, потенциальная энергия воды в поле сил тяготения не меняется, и взаимные превращения возможны только между потенциальной энергией, обусловленной давлением, и кинетической энергией.

На **рис. 6.1.2** показана схема установившегося потока воды на изгибе. Мы смотрим на этот “план” шланга сверху, а поток воды, обозначенный черными линиями, подходит к изгибу, затем поворачивает направо и далее движется по прямой.

Вода подходит к изгибу по прямому участку, на котором ее скорость постоянна и давление распределено равномерно. Скорость на прямом участке постоянна потому, что прямой шланг направляет все линии потока вперед, а вода, которая движется вдоль определенной линии, не может поменять скорость — если бы скорость какой-нибудь части воды увеличилась, позади нее возникло бы пустое пространство, а если бы уменьшилась, то возник бы “затор”. Давление распределено равномерно потому, что постоянство скорости подразумевает отсутствие ускорения, а, следовательно, и перепадов давления.

Постоянство скорости и равномерность распределения давления наглядно отображены на **рис. 6.1.2**. О скорости воды в данной точке можно судить по направлению линий потока и расстоянию между ними. Направление линий совпадает с направлением вектора скорости потока в данной точке, а расстояние между линиями обратно пропорционально этой скорости. Увеличение интервалов между линиями потока указывает на снижение его скорости — замедляя движение, вода растекается вширь, и линии отдаляются друг от друга. Линии потока сближаются в ответ на увеличение скорости — ускоряя течение, вода устремляется вперед, и линии потока сдвигаются ближе друг к другу. Линии потока, направленные к изгибу, — прямые, интервалы между ними одинаковые, стало быть, вода движется вдоль этих линий с одной и той же скоростью.

О давлении в данной точке потока можно судить по оттенку фона на **рис. 6.1.2**. Темный фон соответствует более высокому давлению в потоке, светлый — относительно низкому. На прямых участках фон ровный: давление воды умеренное и распределено равномерно.

Как только поток начинает сворачивать вправо, его скорость и давление меняются. Ускорение воды направлено внутрь изгиба, значит, туда ее подталкивает изменившееся давление. Можно с уверенностью утверждать, что у внешней дуги поворачивающего потока воды образуется область повышенного давления (темная зона), у внутренней дуги давление в потоке уменьшается (это светлая зона). Поворот любого потока всегда сопровождается такими отклонениями давления от среднего значения — на внешней дуге давление всегда выше, чем на внутренней. В конце концов, именно разность давлений поворачивает поток!

### Изгибы и перепады давления

Если траектория установившегося (ламинарного) потока изгибается, давление на внешней дуге поворота всегда выше, чем на внутренней дуге.

Для того чтобы полная энергия вдоль линии потока сохранялась, любому понижению давления в данной точке должно сопутствовать повышение скорости воды в той же точке, и наоборот. Заворачивая по внешней дуге, вода замедляет течение (линии потока расходятся), в то время как давление ее растет; на повороте по внутренней дуге скорость воды увеличивается (линии потока сближаются) с одновременным понижением давления.

Как только шланг вновь выпрямляется, давление и скорость воды возвращаются к тем значениям, которые были до поворота. Вода на внешней дуге набирает скорость, и давление в этой части воды снижается, на внутренней же дуге скорость воды падает, а давление растет. На прямом участке после поворота скорость воды снова становится одинаковой на всех линиях потока, а давление выравнивается.

Какими бы странными ни казались эти перемены в скорости и давлении, они в самом деле происходят и имеют вполне ощутимые последствия. Если бы шланг был прозрачным, то мы могли бы добавить в воду немного капель краски и увидеть в потоке цветные нити, точно такие же, как дуги на **рис. 6.1.2**. А если наш шланг недостаточно прочен и не выдержит избыточного давления, то он,

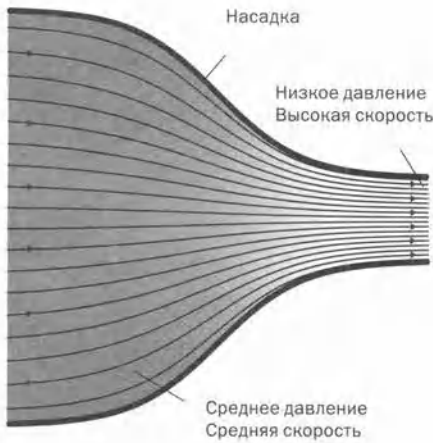


**Рис. 6.1.2.** Скорость и давление воды в изогнутом шланге изменяются. Черные линии указывают путь воды на изгибе шланга. Интервалы между линиями соответствуют снижению скорости (на участках с широкими интервалами поток замедляется), а оттенки фона показывают разницу в давлении (на темных участках давление выше, на светлых — ниже).

вполне вероятно, лопнет именно по внешней стороне изгиба — там, где давление воды максимально.

Вы спросите, где же здесь причина, а где следствие — скорость ли меняется в результате перемены давления, или изменение давления вызвано изменением скорости? Отвечаю: и то и другое происходит одновременно, и то и другое можно считать как причиной, так и следствием. Как только установился ламинарный режим потока, давление воды по ходу отдельно взятой линии потока растет и падает синхронно с увеличением и уменьшением скорости воды. Эти два явления — изменение давления и изменение скорости — неотделимы одно от другого.

## Разбрызгивание через узкую насадку: от давления к скорости



**Рис. 6.1.3.** Сквозь узкую насадку вода течет быстрее, а ее давление падает. Сокращение интервалов между линиями потока говорит о возрастании скорости течения, а изменение оттенка фона от темного к более светлому демонстрирует падение давления.

Когда вода доходит до насадки на конце шланга, оставшаяся у нее потенциальная энергия сил давления преобразуется в кинетическую, и вода через насадку стремительно разбрызгивается. Превращение энергии спровоцировано сужением канала — в насадку входит медленный поток воды под высоким давлением, а выходит быстрая струя при атмосферном давлении.

На **рис. 6.1.3** показано, как прижимаются друг к другу линии потока во время прохождения воды через насадку и возрастает скорость на этом участке. На каждой линии потока вода ускоряет движение, чтобы проскочить сквозь узкое “бутылочное горлышко” насадки, не вызвав при этом затора. Возрастание скорости воды на данном участке сопровождается понижением давления воды на этом же участке, на что указывает переход от более темного фона к светлому.

На выходе из насадки давление воды падает до атмосферного, и весь запас потенциальной энергии сил давления воды переходит в кинетическую энергию. Вода выстреливает в виде узкой и быстрой струи, описывая в воздухе изящную дугу. Да, пожалуй, с такой насадкой у вас получится направить струю в самые дальние уголки сада!

### Распространенное заблуждение: скорость и давление в потоке

**Заблуждение:** Давление в быстром потоке всегда большое.

**На самом деле:** Давление на том или ином участке потока зависит от сложившихся там условий и может быть любым — как низким, так и высоким. Однако если поток ускоряется и при этом течет не сверху вниз, а в горизонтальном направлении, давление в нем будет падать. В этом особом случае чем быстрее будет поток, тем ниже будет давление в нем.

## Переход к турбулентности

Направляя струю воды на растения в своем саду, вы можете заметить два любопытных явления — во-первых, струя оказывает давление на любую поверхность, которая встречается на ее пути и тормозит ее движение, а во-вторых, огибая препятствия, струя дробится на фрагменты. Эффект придавливания — это одно из следствий закона Бернулли; встречаясь с поверхностью препятствия, поток замедляет ход и растекается в стороны. При встрече с препятствием скорость воды снижается, давление растет до уровня выше атмосферного, и именно повышенное давление толкает поверхность препятствия вперед.

А вот раздробление струи на фрагменты — это что-то новенькое. Пытаясь обогнуть препятствие, струя воды теряет свою упорядоченную структуру и распадается на завихрения шипящей пены. Это шипение наверняка вам знакомо — вы слышите его каждый раз, когда открываете кран, чтобы пустить воду в шланг. Поступление воды в шланг регулируется с помощью подвижного затвора в кране; поворачивая вентиль, вы плавно выдвигаете затвор из трубы, вода проходит в шланг, а кран издает шипение. Наталкивается ли вода на лист растения или на затвор крана — в любом случае идет речь о высоких скоростях и о препятствиях, оказавшихся на пути плавного потока.

До сих пор мы говорили только о ламинарном режиме течения — ровном и спокойном, с простым рисунком линий потока. Соседние слои ламинарного потока так всегда и остаются соседними. Скажем, если вы добавите в ламинарную

струю две капли краски, капнув их рядом друг с другом, нити краски так и потекут бок о бок по линиям ламинарного потока (рис. 6.1.4). Ламинарный режим с его упорядоченностью — закономерное следствие внутреннего трения, которое стремится уравнивать скорости течения прилегающих слоев флюида. Поток, движение которого зависит от вязкости, скорее всего, будет ламинарным.

Но если вода не течет размеренно по садовому шлангу, а стремительно несется по валунам и перекатам, то поток разбивается на водовороты с белыми бурунами пены — именно эти буруны делают сплав на плоту по бурной реке таким увлекательным. Если капнуть краску в эти бешеные завихрения, то капля моментально разлетится на тысячи мелких капелек. В потоке возникает турбулентный режим — вода бурлит и шумит, прилегающие слои потока текут независимо друг от друга в непредсказуемых направлениях. Беспорядочный турбулентный режим течения — следствие инерции, которая стремится привести отдельные зоны потока в движение независимо от его собственного импульса. Поток, движение которого определяется инерцией, — как правило, турбулентный.

Очевидно, и лист, на который падает вода, и затвор крана вызывают турбулентность в ламинарном потоке; до появления этих препятствий характер потока определялся вязкостью, а теперь он задается инерцией. Будет ли поток ламинарным или турбулентным, зависит и от его собственных свойств, и от свойств препятствия:

- 1 От вязкости флюида. Под действием внутреннего трения прилегающие слои потока движутся вместе, поэтому высокая вязкость благоприятна для возникновения ламинарного потока (рис. 6.1.5).
- 2 От скорости потока в момент встречи с неподвижным препятствием. Чем быстрее движется флюид, тем быстрее разойдутся в стороны соседние слои и тем труднее будет силам внутреннего трения заставить их по-прежнему двигаться вместе.
- 3 От размера препятствия на пути потока. Чем больше препятствие, тем больше вероятность возникновения турбулентности, так как на длинной дистанции внутреннее трение не сможет удержать поток в упорядоченном состоянии.
- 4 От плотности флюида. Чем она выше, тем слабее поток реагирует на внутреннее трение и тем больше вероятность срыва в турбулентный режим.

Английский математик и инженер Осборн Рейнольдс (1842–1912) обнаружил, что эти четыре фактора можно рассматривать не по отдельности, а как составляющие одного общего параметра, который позволяет сравнивать внешне совершенно различные потоки. Этот параметр, названный числом Рейнольдса, рассчитывается по формуле

$$\text{число Рейнольдса} = \frac{\text{плотность} \times \text{длина препятствия} \times \text{скорость потока}}{\text{вязкость}} \quad (6.1.2).$$

Единицы измерения величин в правой части этого равенства сокращаются, поэтому число Рейнольдса — безразмерная величина, то есть оно выражается обычным числом: скажем, 10 или 25 000.

По мере увеличения числа Рейнольдса влияние вязкости на характер потока ослабевает, а влияние инерции усиливается, то есть ламинарный поток становится турбулентным. Осборн Рейнольдс экспериментально доказал, что турбулентность возникает, когда число, названное его именем, становится равно примерно 2300. Вы можете увидеть этот переход, если будете перемещать в стоячей воде палочку толщиной 1 см. Если палочка движется медленно, со скоростью около 10 см/с, число Рейнольдса равно примерно 1000, и палочку обтекает ламинарный поток. Если увеличить скорость палочки до 50 см/с, число Рейнольдса вырастет до 5000, и поток станет турбулентным.

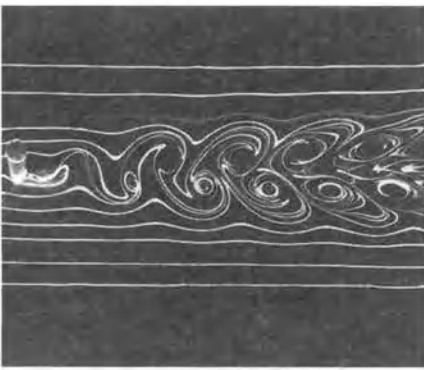
Чаще всего в турбулентном потоке образуются вихри — области вихревого течения, где вода или воздух движутся вокруг центральной воронки. Вихрь — это миниатюрный смерч, торнадо, воронка которого возникает из-за инерции при вращении флюида. Вихрь можно увидеть позади только что сделавшего гребок лодочного весла или в чаше миксера. Если тело движется в текучей среде достаточно быстро, чтобы возникла турбулентность, начинают формироваться вихри, причем они всегда формируются непосредственно позади тела (препятствия), од-



Рис. 6.1.4. Вверху: вода медленно течет между камней, благодаря ее вязкости поток остается спокойным и ламинарным. Внизу: вода течет через пороги быстро, и ее инерция заставляет поток бурлить с образованием очагов турбулентности.



Рис. 6.1.5. Благодаря высокой вязкости мед вытекает из банки мягкой струей (ламинарный режим). У воды вязкость низкая, поэтому в фонтане разлетаются брызги (турбулентный режим).



**Рис. 6.1.6.** Когда вода быстро течет вокруг цилиндра, поток становится турбулентным. В правой части этого цилиндра формируется структура завихрений.

нако тут же уносятся потоком и образуют попутную струю с вихревыми зонами — вихрями, которые освободились от породившего их тела (**рис. 6.1.6**).

В то время как ламинарный поток абсолютно предсказуем, турбулентный хаотичен, то есть не упорядочен — предугадать направление движения каждой отдельной капли потока невозможно. Изучение неупорядоченности — относительно новая область науки. Хаотическая (то есть склонная к нарастанию беспорядка) система чрезвычайно чувствительна к начальным условиям, и малейшие изменения в этих условиях могут привести к огромным изменениям в дальнейшем развитии событий.

Даже незаметную на глаз турбулентность водного потока можно услышать. Неупорядоченное движение в зонах турбулентности приводит к частичному превращению полной энергии воды в тепловую энергию и звук. Турбулентность приводит к небольшому уменьшению полной энергии воды сразу после выхода из крана в шланг, а следовательно, и к снижению скорости струи, которая в конце шланга вылетает из насадки и разбрызгивается на растения.

Если вы вдруг перекроете воде выход из насадки, остановив ее течение, звук будет иным. Движущаяся вода имеет импульс, и чтобы ее резко остановить, потребуется приложить немалую направленную против движения силу. Поскольку состояние замедляющегося потока неустойчиво, закон Бернулли к нему неприменим, и в районе контакта движущейся воды с лобовым препятствием давление может подскочить до астрономических значений. Скачок давления сообщит воде направленное назад ускорение, так что она замедлит ход и поток остановится, в результате чего вы услышите глухой звук удара. Так называемый гидравлический удар — резкое повышение давления в передней части потока — приводит к тому, что насадка пытается вырваться у вас из рук, а шланг раздувается. Иногда в результате гидравлического удара вибрируют и издают резкий стук трубы в вашем доме.

## Кран, винт и уплотнители

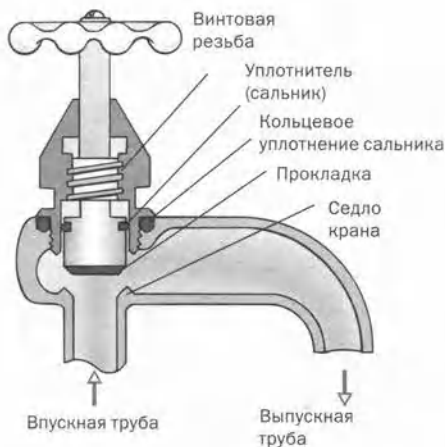
Полить цветы нелегко, если вы не можете включить (а потом, конечно, выключить) воду. А чтобы включить воду, вам необходим кран. И даже если вы живете в квартире-студии на тридцатом этаже и за окошком у вас нет никаких признаков ящика для цветов, то уж кран-то у вас наверняка имеется.

В водопроводный кран любой конструкции непременно входит узел, регулирующий расход воды, и тот тип крана, что изображен на **рис. 6.1.7**, — наверное, самый старый и самый распространенный. Истечение воды из крана контролируется с помощью резиновой прокладки. Закрытый кран прижимает прокладку к впускной трубе и перекрывает путь воде. Если вы откроете кран, прокладка отодвинется от впускной трубы, и вода потечет. Резиновая прокладка надета на конец штока, который поднимается и опускается при помощи винта, который вы поворачиваете вентиляем. Но зачем крану винт? Почему нельзя просто толкнуть шток с прокладкой вниз и перекрыть воду — или вытянуть его назад и позволить воде свободно вытекать?

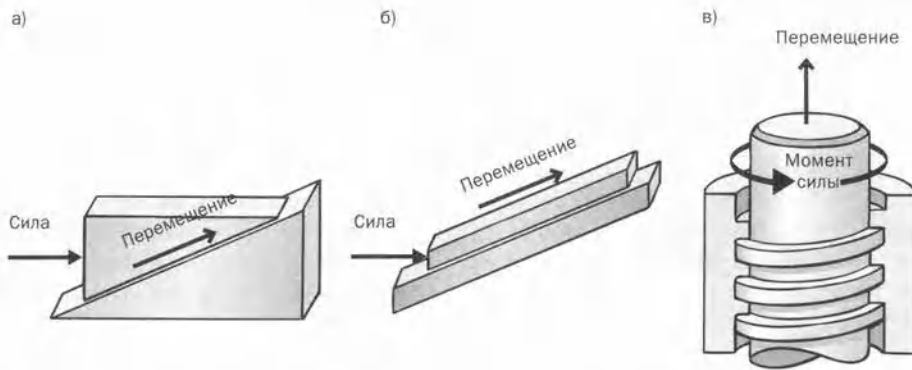
Оказывается, при столь простой схеме трудно справиться с давлением. Когда прокладка прижата к впускной трубе и не пускает воду, давление на входе в кран задано давлением в городской сети водоснабжения, а давление на выходе из крана равно атмосферному. В результате на прокладку на **рис. 6.1.7** действует большой перепад давлений, то есть большая направленная вверх сила. Чтобы удержать кран в закрытом состоянии, вам придется с большой силой давить на шток сверху, а он в это же время будет стремиться выскочить вверх. Чтобы обеспечить вашу победу в этой борьбе, кран, как правило, и снабжают винтом.

В разделе 4.4, когда речь шла о лифтах, я уже говорил, что винт — это вращающееся устройство, которое обеспечивает выигрыш в силе. По сути дела, винт и муфта на корпусе крана, в которую он входит, можно рассматривать как два цилиндра с прорезанными на их стенках спиральными пандусами. Поверхности этих пандусов скользят одна по другой, когда цилиндры поворачиваются. Если мы перемещаем по одному наклонному пандусу другой наклонный пандус (**рис. 6.1.8, а**), то видим, что один из них перемещается вверх относительно другого. Однако в случае с краном нас интересуют только поверхности пандусов (**рис. 6.1.8, б**). И если эти поверхности вписаны в цилиндр, получится винт (**рис. 6.1.8, в**).

Эти цилиндрические пандусы называются резьбой винта. В винтовом соединении резьбу имеют и внутренний, и внешний цилиндры. Внутренний цилиндр



**Рис. 6.1.7.** Водопроводный кран с резиновой прокладкой частично или полностью перекрывает впускную трубу и тем самым регулирует расход воды. Положение прокладки фиксируется винтом, который соединен с маховиком. Еще несколько прокладок не дают образоваться протечкам.



**Рис. 6.1.8.** (а) Когда вы толкаете подвижный уголок по неподвижному, первый скользит вверх относительно второго. (б) То же самое можно сказать о двух наклонных поверхностях. (в) Если наклонная поверхность огибает цилиндр наподобие цилиндрического пандуса, образуется винт. Вращающийся подвижный цилиндр перемещается вверх или вниз относительно внешнего, неподвижного.

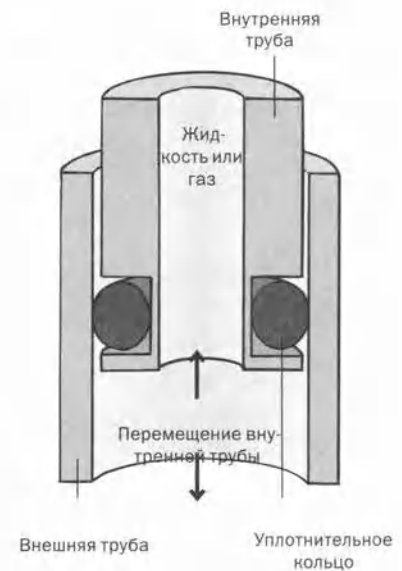
с резьбой — это болт, а внешний — гайка (или муфта с резьбой). Когда внутренний цилиндр поворачивается относительно внешнего, резьба болта скользит по резьбе гайки. В зависимости от направления относительного вращения внутренний цилиндр поднимается или опускается относительно внешнего.

В процессе относительного скольжения двух наклонных пандусов действующие на них умеренные горизонтальные силы порождают большие вертикальные. То же самое происходит в винтовом соединении — действующий на винт умеренный момент силы порождает большую вертикальную силу. Винт, как и пандус, дает выигрыш в силе. В данном случае вы несколькими оборотами маховика создаете момент силы умеренной величины, который создает огромную силу при небольшом перемещении штока вниз. Работа, которую вы совершаете, закрывая кран, одна и та же, независимо от того, вдавливаете ли вы шток в трубу или заворачиваете его с помощью резьбы. Однако винт распределяет эту работу и позволяет вам приложить относительно небольшую силу и момент силы, распределив их на большее расстояние или больший угол поворота. Винт легко обеспечивает большую силу, необходимую для того, чтобы прижать прокладку к отверстию находящейся под большим давлением впускной трубы. Более того, на резьбе развиваются достаточно большие силы трения, которые не позволят винту отвинтиться, пока вы этого не захотите. С помощью трения винт продолжает прижимать прокладку к впускной трубе, даже когда вы снимаете руку с маховика крана.

Водопроводный кран — не монолитный объект, он состоит из нескольких соединенных меж собой деталей, и каждое соединение — это место потенциальной протечки. Однако кран не протекает, потому что путь воде через все его соединения преграждают уплотнители. Прокладка служит уплотнителем, когда кран закрыт — она сопротивляется напору входящей воды и не дает ей пройти через кран. Но в кране есть еще по крайней мере два уплотнительных кольца круглого сечения или аналогичных приспособления. Уплотнительное кольцо круглого сечения имеет форму бублика, изготовленного из твердого, но пластичного эластомера (упругого материала, похожего на резину). Уплотнительное кольцо из эластомера, вставленное в кольцевой желобок, не позволяет жидкости или газу просачиваться в зазор на стыке металлических, пластмассовых или керамических деталей (**рис. 6.1.9**). Эластомер запасает энергию при деформации и высвобождает ее, когда восстанавливает первоначальную форму. Кольцевые прокладки защищают от протечек и наш кран. Одна из них, насаженная на шток, обеспечивает герметичность даже в тот момент, когда шток, вращаясь, движется вверх или вниз.

Благодаря своей упругости уплотнительные кольца особенно эффективны, когда надо остановить поток воды. В разделе 17.3 мы еще поговорим об упругих материалах, особенно о натуральном и синтетическом каучуках. Сейчас для нас важен тот момент, что уплотнительное кольцо из эластомера сохраняет упругость лишь в определенном интервале температур. В 1986 году космический корабль “Челленджер” взорвался из-за того, что одно из уплотнительных колец на одном из двигателей замерзло, утратило эластичность и перестало обеспечивать герметичность.

Там, где кольцевая прокладка деформируется, теряя равновесную форму, и испытывает действие большой возвращающей силы (силы упругости), она давит на поверхности контакта, заполняет все промежутки между ними и блокирует ток воды. Сжатая в уплотнительном узле прокладка стремится восстановить свою равновесную форму и создает герметичное уплотнение.



**Рис. 6.1.9.** Кольцевая прокладка герметизирует стык внутренней и внешней труб. На наружной поверхности внутренней трубы имеется паз, в который вставляется прокладка. При перемещении внутренней трубы внутри внешней прокладка скручивается и смазывается веществом, наполняющим трубы. Кольцевая прокладка способна многие годы обеспечивать герметичность соединения, даже если трубы вдруг сместятся относительно друг друга. Уплотнительные кольца (кольцевые прокладки) появились во время Второй мировой войны, что позволило усовершенствовать гидравлические фитинги в самолетах и другой боевой технике.

Когда прокладка поворачивается и скользит внутри крана, на нее действует трение скольжения. Несмотря на то что вода служит смазкой, уплотнительное кольцо изнашивается в ходе постоянной эксплуатации крана, и когда износ достигает определенной степени, начинает пропускать воду — тогда ее надо заменить. Чтобы уменьшить износ и увеличить срок службы кольцевых прокладок, детали оборудования, по которым скользят прокладки, гладко полируют.

Прокладка, регулирующая расход воды, тоже подвержена износу. Она деформируется каждый раз, когда ей приходится сдерживать напор воды. Как любая деталь из эластомера, прокладка накапливает энергию в процессе деформации и высвобождает ее, возвращаясь в первоначальное состояние. Но постоянное трение о впускную трубу, повторяющиеся в течение долгого времени деформации и перегрев в горячей воде неизбежно и навсегда меняют равновесную форму прокладки. Прижатая к впускной трубе прокладка, которая приобрела новую равновесную форму, больше не деформируется и не может заполнить щели между поверхностями, в результате возникает протечка. Чтобы закрыть кран, придется снять вентиль, шток и держатель штока и заменить прокладку. На время ремонта вам придется перекрыть воду с помощью запорного вентиля — еще одного устройства, похожего на кран, которое устанавливается между магистральной трубой и краном, обычно под раковиной на кухне или в ванной, а также в том месте, где магистральная труба входит в дом.

## Проблемы с водопроводом

Со временем просвет водопроводной трубы сужается из-за минеральных отложений в ней. Сужение приводит к тому, что вам нужно все больше времени, чтобы наполнить ванну. Ни разница давлений воды до и после крана, ни длина труб вроде бы не изменились, однако, как гласит закон Пуазейля, незначительное уменьшение диаметра трубы производит огромный эффект на расход воды. Пробираясь сквозь место сужения в трубе, вода быстро теряет полную энергию и еле-еле сочится из крана. Сужение трубы всего на 15% приводит к уменьшению расхода воды вдвое. Об аналогичной медицинской проблеме см. 5.

Конечно, неприятно ждать, когда же наконец наполнится ванна, но это еще не самое страшное. Представьте себе, что вы стоите под душем, а в это время кто-то из ваших соседей спускает воду в туалете. В обычной (точнее, совершенно ненормальной) ситуации вас неожиданно обдаст кипятком. Жители старых домов с плохой звукоизоляцией знают: едва заслышав звук спускаемой воды, надо срочно выскакивать из-под душа.

Неожиданный скачок температуры вызван резким падением давления в трубе, подающей холодную воду в смеситель душа. Пока холодная вода поступает только в насадку душа, ее расход невелик, и она течет по трубе относительно медленно. Медленно текущая вода теряет по пути мало полной энергии в виде тепловой, поэтому к моменту ее выхода из душевой насадки давление остается довольно высоким. Горячая вода тоже сохраняет большую часть своей полной энергии и поступает в душ под высоким давлением. Два потока, холодный и горячий, беспрепятственно смешиваются и проливаются на вас дождем вполне комфортной температуры.

Но если в этот момент кто-то вдруг нажмет на кнопку сливного бачка, то в унитаз направится сразу много холодной воды. Расход воды в холодной трубе резко увеличится, и на пути одновременно к душу и бачку быстро движущаяся вода потеряет много полной энергии. Теперь холодная вода подается в смеситель при относительно низком давлении и смешивается с горячей водой в совершенно другой пропорции. Возможно, в какой-то момент горячая вода, по-прежнему находящаяся под высоким давлением, даже потечет вспять — не в насадку душа, а в трубу с холодной водой, где давление ниже. Так или иначе, из душа теперь хлещет чуть ли не кипяток — ради вашей собственной безопасности как можно быстрее выскакивайте из-под струи!

В вашем водопроводе может возникнуть и еще с одна проблема — гидравлический удар, о котором я уже упоминал. Глухой звук гидравлического удара вы услышите при резкой остановке потока воды. Когда кран полностью открыт, вода свободно течет по трубе к его носику. Она обладает импульсом, и чем длиннее труба и чем быстрее движется вода, тем больше этот импульс. Если быстро завернуть

5 Небольшое уменьшение просвета артерии существенно ухудшает ток крови в ней. Поэтому следует более строго следить за своим рационом, чтобы кровь свободно текла по жилам.



кран, вся движущаяся масса воды резко остановится, а крану придется приложить к массивному столбу воды большую силу. Поскольку приложить силу к жидкости можно только посредством давления на нее, давление у фронта движущейся воды возрастает до огромных значений. Под воздействием перепада давления ближайший к затвору крана слой воды приобретает направленное назад ускорение и немедленно останавливается. Если гидравлический удар был достаточно мощным, вы услышите, как завибрировали трубы. Вода резко передала свой импульс трубам и крану — так молоток передает импульс гвоздю, по которому он бьет.

Гидравлический удар — не такая уж безобидная вещь, в результате сильного удара может даже лопнуть труба. Однако гидравлический удар можно смягчить с помощью воздушных амортизаторов — так называемых гасителей (рис. 6.1.10). Добросовестный сантехник установит на подводке к стиральной машине и другой бытовой технике такие гасители — вертикальные запаянные сверху трубки. Гасители заполнятся воздухом, который всегда растворен в воде и постоянно выделяется из нее естественным путем. Запертый в гасителе воздух смягчает гидравлический удар, предотвращая резкую остановку потока: вода, внезапно натолкнувшись на резко закрытый кран, плавно сжимает воздух в гасителе. В результате вода передает трубе тот же самый импульс, но он создается при длительном воздействии небольшой силы.

Гидравлические удары случаются не только в бытовом водопроводе, они могут произойти где угодно, когда какое-либо препятствие неожиданно преграждает путь быстрому потоку воды. Давление воды и сила, с которой она действует на препятствие, моментально возрастают, особенно если вода не имеет возможности обойти препятствие. Внезапный ливень способен мгновенно наполнить водой пересохшее русло реки, и этот поток может подхватить автомобиль, опрокинуть его гидравлическим ударом, смять и даже унести с собой. Такой же эффект производит волны, разбиваясь о скалы. Внезапно возросшее давление выбрасывает воду высоко в воздух сквозь расщелины и проемы в камнях.

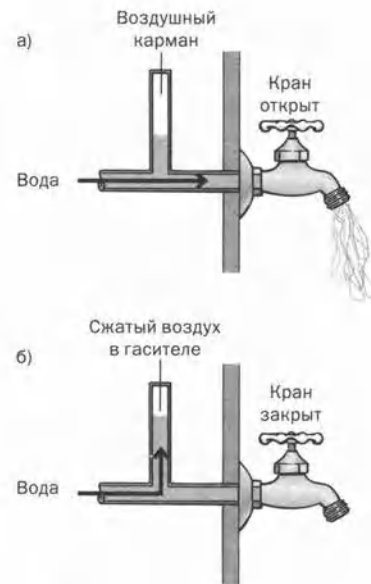
## Еще немного хаоса

Неупорядоченные системы особенно чувствительны к начальным условиям — малейшие перемены в исходном состоянии кардинально меняют их будущее. Пример неупорядоченной, хаотичной системы — движение по перегруженной автомагистрали. Если один-единственный неправильный маневр соседней машины помешает вам своевременно перестроиться в нужный ряд, вы можете запросто оказаться в другом городе.

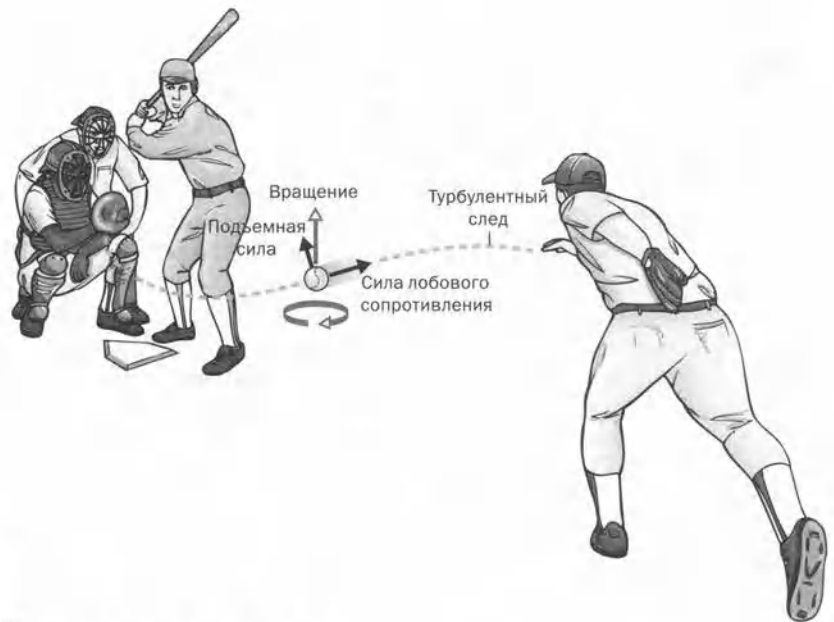
Турбулентный поток — классический пример неупорядоченной системы. Самые незначительные изменения любых его свойств приводят к совершенно новому рисунку завихрений и воронок. Увлекаемая водой песчинка движется по непредсказуемому пути. А две песчинки, которые вместе попали в турбулентный поток воды, вскоре окажутся в разных местах, и чем дальше вы будете за ними наблюдать, тем более неожиданным будет их поведение. Взаимное удаление частиц и расхождение их путей, ранее пролежавших рядом, — отличительная особенность хаотичной системы.

Атмосфера тоже представляет собой хаотическую систему, и незаметные процессы, развивающиеся в воздухе сегодня, могут стать причиной смены погоды завтра или через неделю. Воздушные потоки вблизи земли порождают множество воронок и вихрей, типичных для турбулентных, неупорядоченных потоков. Крошечные изменения вблизи поверхности земли могут самым серьезным образом повлиять на эти турбулентные потоки и даже изменить направление ветра.

Нередко говорят, что всего одна бабочка, всего раз махнув крылышками, может породить турбулентность, которая в конце концов повлияет на глобальную погоду. В самом деле, бабочка влияет на потоки воздуха рядом с собой, они, в свою очередь, влияют на ветер в большем масштабе и так далее, до самых дальних пределов земной атмосферы. Именно из-за этой непредсказуемости атмосферы очень сложно делать прогнозы погоды. Не стоит доверять прогнозу, составленному больше чем на день вперед, — отследить взмахи крылышек всех бабочек мира попросту невозможно!



**Рис. 6.1.10.** Вода, которая течет по трубе, имеет импульс. Если резко перекрыть воду, в момент ее остановки на трубу и кран подействует большая сила. Чтобы уменьшить пиковую нагрузку, на трубу ставят гаситель гидравлического удара. Сжимая воздух, вода останавливается постепенно, поэтому сила, приложенная с ее стороны к крану и трубам, уменьшается.



## 6.2 Мяч и воздух

Многие эпизоды и нюансы таких спортивных игр, как бейсбол и гольф, во многом определяются взаимодействием мяча и воздуха. Если устроить бейсбольный матч на Луне, где нет атмосферы, то в игре не произойдет ничего более увлекательного, чем банальное падение мяча после быстрой прямой подачи. А в лунном гольфе не пришлось бы переживать из-за ошибок, которые приводят к отклонениям мяча от заданного курса. В этом разделе мы узнаем, как влияет воздух на полет мяча и ему подобные тела.

### Медленный полет: ламинарный воздушный поток

Первое, на что вы обратите внимание, вступив в новый бейсбольный клуб на Луне, — это что брошенный мяч попадает на основную базу быстрее, чем проделывал это дома, на Земле. Поскольку на Луне нет атмосферы, то нет и сопротивления воздуха, которое тормозит полет мяча. В предыдущем разделе этой главы мы обсуждали, как влияют препятствия в потоке на поведение жидкости. А теперь мы займемся аэродинамикой — наукой о динамических процессах в воздухе, — и нас будет интересовать, как влияет поток на движущиеся в нем тела. О том, можно ли применить закон Бернулли к аэродинамическим системам, см. 1.

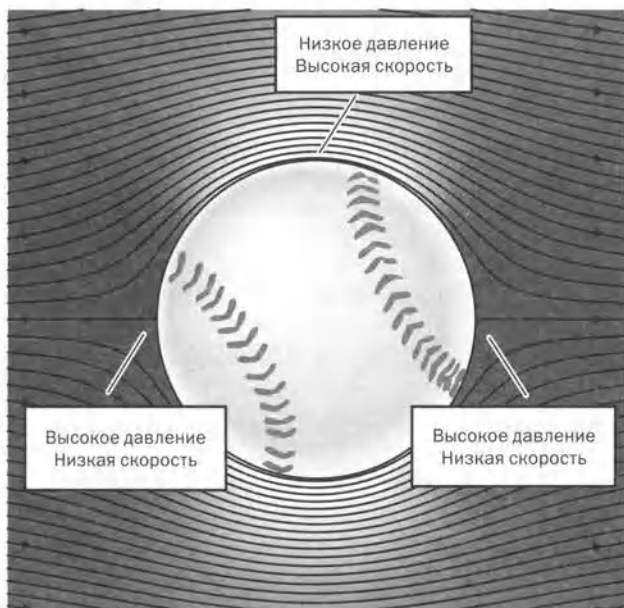
На движущийся в воздухе мяч действуют аэродинамические силы, приложенные к мячу со стороны воздуха и возникающие в результате относительного движения мяча и воздуха. Это сила лобового сопротивления, которая толкает мяч назад, и подъемная сила, которая толкает мяч в ту или в иную сторону (рис. 6.2.1). Мы начнем изучение аэродинамики мяча с силы лобового сопротивления (обычно говорят просто о сопротивлении воздуха) и прежде всего рассмотрим случай, когда мяч движется медленно. Начнем же мы именно с этого, поскольку при низких скоростях вязкость способна упорядочить воздух, обдувающий мяч; вязкость в этом случае преобладает над инерцией, поэтому вокруг мяча формируется ламинарный воздушный поток.

На рис. 6.2.2 показаны линии ламинарного потока воздуха рядом с медленно движущимся мячом. На самом деле неважно, летит ли в воздухе мяч, или воздух медленно движется мимо него, — картина будет одна и та же. Для простоты давайте двигаться вместе с мячом и рассматривать воздушный поток из связанной с мячом инерциальной системы отсчета. В этой инерциальной системе отсчета воздух будет обтекать неподвижный мяч.

Медленный поток воздуха аккуратно разделяется у передней поверхности мяча и снова воссоединяется позади него. Возникает спутная струя — воздушный след позади мяча, ровный, без турбулентности. Но скорость воздуха и давление



**Рис. 6.2.1.** На тело в воздухе действуют аэродинамические силы двух типов — сила лобового сопротивления и подъемная сила. Лобовое сопротивление действует в направлении, параллельном набегающему потоку, и замедляет движение тела в воздухе. Подъемная сила направлена перпендикулярно воздушному потоку и толкает тело в ту или другую сторону. Подъемная сила не всегда направлена вверх.



**Рис. 6.2.2.** Вокруг медленно движущегося мяча формируется ламинарный поток воздуха. Перед мячом и за ним скорость воздуха понижается (интервалы между линиями потока большие), а давление повышается (фон рисунка более темный). По обе стороны от мяча воздух движется быстро (линии потока сближаются), а давление падает (фон светлый). Но силы давления полностью уравновешены, поэтому сопротивление давления на мяч не действует — только сопротивление вязкости.

в прилегающих к мячу слоях неодинаковы. Как мы видели в предыдущем разделе, воздушный поток, обходя мяч, несколько раз изгибается, а изгибы сопровождаются перепадами давления. На удалении от мяча давление всегда атмосферное, поэтому перепады вызываются изменениями давления воздуха вблизи мяча. Если воздушный поток отклоняется от мяча таким образом, что мяч оказывается на внешней стороне изгиба потока, то давление воздуха рядом с мячом должно стать больше атмосферного. А если поток огибает мяч и тот оказывается внутри изгиба, то давление воздуха рядом с мячом должно быть ниже атмосферного.

С учетом всего сказанного давайте рассмотрим медленный поток воздуха, огибающий мяч. Воздух встречается с передней поверхностью мяча и отклоняется от нее, поэтому перед мячом давление выше атмосферного. Повышение давления сопровождается уменьшением скорости воздушного потока относительно мяча. На **рис. 6.2.2** области повышенного давления показаны темным фоном, а уменьшение скорости воздуха — более широкими промежутками между линиями потока.

Далее воздушный поток огибает мяч и поворачивает к нему, так что давление по обе стороны от мяча становится ниже атмосферного. Понижение давления сопровождается ростом скорости воздуха. На **рис. 6.2.2** области пониженного давления показаны светлым фоном, а нарастание скорости воздуха — сближающимися линиями потока.

Ламинарный поток воздуха достигает задней поверхности мяча и вытягивается вслед за мячом. Поскольку воздух отделяется от мяча и вновь отворачивает от него, давление за мячом выше атмосферного. Опять же темный фон на **рис. 6.2.2** говорит о повышении давления, а большие промежутки между линиями потока — об уменьшении скорости воздуха.

Возможно, вам покажется странным, что давление воздуха у разных сторон одного и того же мяча не одинаково, однако в воздушном потоке именно так и происходит (см. **2**). Особенно интересно, что воздух низкого давления (то есть проходящий сбоку от мяча), обогнув мяч, оказывается позади него, где давление выше. Воздушный поток испытывает действие перепада давления, и этот перепад давления толкает поток в обратную сторону, против движения мяча. Однако разница давления порождает ускорение, а не скорость, и воздушный поток с низким давлением, огибающий мяч, обладает достаточным запасом энергии и направленным вперед импульсом, чтобы проделать весь путь мимо мяча до его задней стороны. Несмотря на замедление в области высокого давления, воздушный поток успешно завершает свой путь.

Воздушный поток, огибающий мяч, симметричен, и силы давления, которые действуют на мяч со стороны воздуха, тоже симметричны. Эти силы полностью уравновешиваются, поэтому в целом мяч не испытывает действия сил давления.

**1** Строго говоря, закон Бернулли не применим к воздуху — этот закон касается только несжимаемых жидкостей в полностью устоявшемся потоке, а воздух никак не назовешь несжимаемым. Однако при определенных условиях — если скорость движения воздуха не превышает 300 км/ч и разность давлений составляет не больше 0,1 атмосферы — можно считать воздух несжимаемым, так как его плотность практически постоянна. Это намного упрощает нам обсуждение крученной подачи в бейсболе, а также принципов действия самолетов и пылесосов. Кроме того, мы пренебрегаем силой тяжести. Если бы воздух перемещался вверх и вниз на сотни метров, пришлось бы учесть земное притяжение, но в данном случае оно не играет роли, так как все процессы идут на одной высоте.

**2** Перепады давления в ветре, обдувающем автомобиль и здания, — обычное дело. Перед машиной давление максимально, а рядом с передними боковыми окнами минимально. Позади заднего стекла воздушный поток выравнивается, и его давление совпадает с атмосферным. Если вы откроете переднее боковое окно, воздух вырвется из машины и давление в салоне понизится. Если теперь опустить заднее боковое окно, воздух устремится через него обратно в салон. Такая картина циркуляции воздуха объясняет, почему мусор, выброшенный в переднее окно, снова залетает в машину через заднее окно. У наветренной стены здания давление воздуха максимально, а у наружной поверхности выгнутых боковых стен оно может быть достаточно низким. Из-за перепада давления в ветреный день бывает нелегко открыть дверь или она может резко распахнуться — в зависимости от ее положения на петлях. Мало того, у поверхности остроконечной крыши на ветру формируется область низкого давления, и ураганный порыв ветра может ее сорвать.

3 Если тело обдувается ламинарным потоком воздуха, то действующие на него силы давления полностью уравновешены и сопротивления воздуха из-за перепада давления не возникает — сопротивление давления отсутствует. Поначалу это ставило в тупик ученых, изучавших аэродинамику, — они считали, что поток воздуха вокруг пылинки ламинарный и на пыль действует сила сопротивления. Эта загадка получила название парадокса Д’Аламбера — в честь французского математика Жана Лерона Д’Аламбера (1717–1783), который впервые сформулировал проблему. Д’Аламбер и его современники ничего не знали о настоящей причине замедления движения пылинок в воздухе — силе вязкого трения.



Рис. 6.2.3. Тонкий слой воздуха, обтекающего поверхность, тормозится силами вязкого сопротивления. Пограничный слой, который взаимодействует с поверхностью, остается ламинарным при числах Рейнольдса, достигающих 100 000, но выше этого значения окончательно переходит в турбулентный режим. Однако свободный поток воздуха становится турбулентным при гораздо более низких числах Рейнольдса, обычно при 2000 и выше.



Рис. 6.2.4. Первые аэродинамические опыты произвел французский инженер Гюстав Эйфель (1832–1923), создатель башни, которая теперь носит его имя. В 1890 году Эйфель сбрасывал со своей башни различные предметы и измерял действовавшее на них сопротивление воздуха. Используя результаты экспериментов Эйфеля, Прандтль объяснил снижение сопротивления воздуха при возникновении турбулентности в пограничном слое.

Самое важное здесь — то, что высокое давление перед мячом компенсируется высоким давлением позади него. Симметричное распределение давления приводит к тому, что на мяч действует только одна аэродинамическая сила — сопротивление вязкости, то есть направленная вдоль потока сила трения, которая возникает при скольжении вязких слоев воздуха по поверхности мяча (см. 3).

Мы скоро узнаем, что вязкое сопротивление составляет лишь малую долю общего сопротивления воздуха, действующего на спортивные мячи, однако эта сила способна долгими часами удерживать в воздухе пыль и обязательно учитывается в конструкции крыла самолета. Она уже нам встречалась в предыдущем разделе — вязкое сопротивление замедляло ток воды из садового шланга.

## Быстрый полет мяча; турбулентный воздушный поток

Мячи не всегда обдуваются ламинарным потоком. Часто, особенно в спортивных играх, возникает и турбулентность, которая создает силу сопротивления воздуха нового для нас типа. Если рядом с мячом образуется турбулентный воздушный поток, давление распределяется уже несимметрично и мяч подвергается воздействию сопротивления давления — направленной вдоль потока силы, которая возникает из-за разности давлений в потоке воздуха. Результирующая сила, возникающая из-за перепада давления, действует на мяч и замедляет его полет в воздушной среде.

Турбулентный поток и сопротивление давления начинают воздействовать на мяч при числах Рейнольдса больше 2000. Число Рейнольдса (мы познакомились с ним в предыдущей главе) увязывает размеры и скорость мяча с плотностью и вязкостью воздуха и говорит о том, каким фактором определяется характер потока — вязкостью или инерцией. При малых числах Рейнольдса влияние вязкости воздуха преобладает над влиянием инерции, и поток будет ламинарным. При больших числах Рейнольдса инерция сказывается сильнее, чем вязкость, и поток становится турбулентным. Однако что-то должно спровоцировать переход к турбулентности — таким стимулятором служит вязкость.

Чтобы понять, какую роль играет вязкость, надо изучить свойства и поведение воздуха вблизи мяча. Даже при сильном ветре вязкость затормаживает тонкий слой воздуха, прилегающий к поверхности мяча (рис. 6.2.3). Этот пограничный слой, обнаруженный Людвигом Прандтлем (см. 4) не без помощи Гюстава Эйфеля (рис. 6.2.4), движется медленнее, и его полная энергия меньше полной энергии свободно движущегося воздуха в удаленных от поверхности мяча слоях.

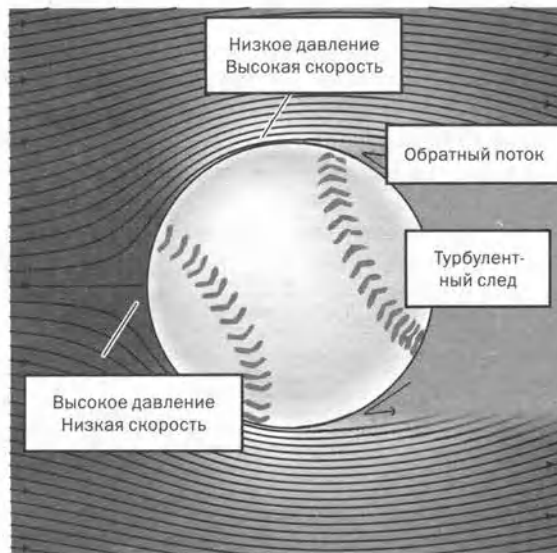
По мере движения к задней стороне мяча воздушный поток проходит через положительный градиент давления — зону, где возрастающее давление толкает воздух назад и вынуждает его снизить скорость. Хотя свободный воздушный поток за пределами пограничного слоя имеет достаточную энергию и импульс, чтобы продолжать двигаться вперед и самостоятельно достичь области позади мяча, о воздухе в пограничном слое этого сказать нельзя. Ему необходим толчок вперед.

При низких числах Рейнольдса пограничный слой подталкивается всей массой воздуха вплоть до задней стороны мяча, и поток остается ламинарным. Но при высоких числах Рейнольдса внутреннего трения между свободно движущимся и пограничными слоями не хватает для дальнейшего продвижения пограничного слоя в область повышенного давления за мячом.

Без эффективной помощи пограничный слой неизбежно срывается — воздух в нем останавливается и тем самым нарушает устойчивый режим потока. Но что еще хуже, в результате срыва потока воздух пограничного слоя под действием неблагоприятного градиента давления поворачивает обратно и возвращается к боковым поверхностям мяча. При этом он «вклинивается» между мячом и свободно движущимися слоями. Происходит настоящая аэродинамическая катастрофа: воздушный поток отделяется от мяча, оставляя позади него широкий турбулентный след — воздушный карман (рис. 6.2.5).

Турбулентный след уже не дает воздушному потоку плавно отвернуть от задней поверхности мяча, и в этой зоне больше не растет давление: давление позади мяча практически равно атмосферному. Отсутствие зоны повышенного давления за мячом нарушает симметрию действующих на мяч сил, они больше не уравновешивают друг друга. На мяч действует направленная вдоль потока результирующая сила давления — сопротивление давления. В итоге мяч в турбулентном слое

**Рис. 6.2.5.** Когда скорость мяча поднимает число Рейнольдса до величин 2000–100 000, в зоне повышенного давления позади мяча происходит срыв ламинарного пограничного слоя. Образовавшийся обратный поток приводит к тому, что основная масса воздуха отделяется от поверхности мяча и формирует широкий турбулентный след. Среднее давление позади мяча остается низким, и мяч испытывает действие большого сопротивления давления.



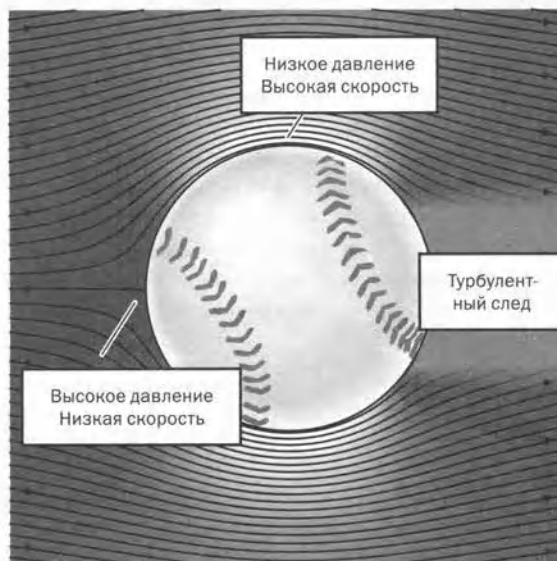
передает воздуху направленный вперед импульс и тянет за собой спутную струю. Сопротивление давления замедляет полет любого мяча, который движется быстрее улитки. Сила сопротивления давления примерно пропорциональна площади сечения турбулентного воздушного кармана и квадрату скорости движения мяча в воздухе. Для мяча, который летит с умеренной скоростью, воздушный карман примерно соответствует его диаметру, поэтому сила сопротивления давления велика.

### Ямки на мяче для гольфа

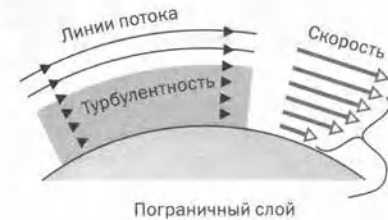
Если бы история на этом заканчивалась, не видать бы нам ни хоум-рана в бейсболе, ни броска на 250 ярдов в гольфе. Но у инерции еще есть козыри в запасе.

При очень больших числах Рейнольдса пограничный слой сам становится турбулентным (рис. 6.2.6). Ламинарное течение прекращается, и поток начинает быстро перемешиваться как внутри себя, так и со свободно движущимся соседним слоем. Благодаря перемешиванию пограничный слой получает добавочные энергию и направленный вперед импульс, он уже не так легко тормозится и сильнее сопротивляется встречному потоку. Несмотря на то что пограничный слой все равно срывается, не достигнув задней стороны мяча, сорвавшиеся воздушные струи движутся против потока очень недолго. Свободно текущий поток продолжает отделяться от поверхности мяча, но это происходит гораздо дальше позади мяча, и турбулентный слой получается относительно узким (рис. 6.2.7).

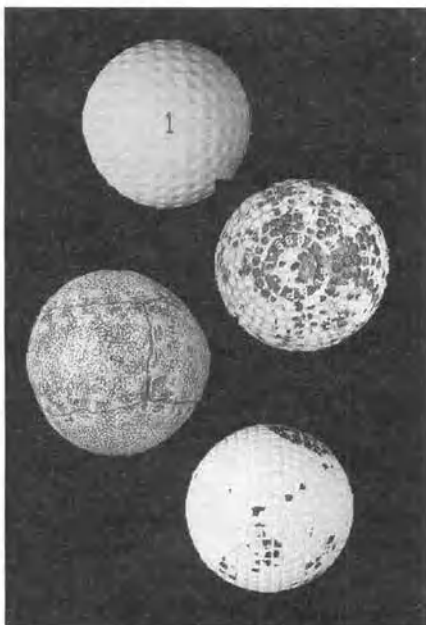
**Рис. 6.2.7.** Если мяч летит так быстро, что число Рейнольдса превышает 100 000, пограничный слой рядом с ним становится турбулентным. Прежде чем этот турбулентный слой сорвется с поверхности мяча, он успевает пройти вдоль значительной части этой поверхности. За ним следуют свободные слои, и вместе они образуют относительно небольшой турбулентный след. Сила сопротивления давления, действующая на мяч, невелика.



④ Немецкий инженер Людвиг Прандтль (1875–1953) — автор многих революционных идей в аэродинамике, в частности теории пограничного слоя. Прандтль мечтал сделать Геттингенский университет мировым центром изучения аэродинамики и был так занят работой, что ему некогда было ухаживать за потенциальными невестами. Решив, что ему пора жениться, Прандтль написал супруге своего бывшего ассистента и попросил у нее руки одной из двух ее дочерей, которой — неважно. На семейном совете была выбрана старшая из сестер, и свадьба состоялась.



**Рис. 6.2.6.** При числах Рейнольдса больше 100 000 пограничный слой воздушного потока, обтекающего поверхность, становится турбулентным. Новый вихревой поток получает от свободных слоев воздуха дополнительные энергию и импульс, получая возможность глубже проникнуть в область повышенного давления.



**Рис. 6.2.8.** Первые мячи для гольфа (слева) делали вручную из кожи и набивали перьями. Лишь когда появились дешевые мячи из твердой резины — гуттаперчи, гольф стал по-настоящему популярным. Однако новые гладкие гуттаперчевые мячики летали не слишком далеко, и на них стали делать насечки, чтобы увеличить дальность полета. Вскоре появились мячи с разнообразными рисунками канавок (внизу и справа), и такие мячи летали гораздо дальше, чем гладкие. Поверхность современного мяча для гольфа покрыта не насечками, а ямками (вверху).



**Рис. 6.2.9.** Пограничный слой становится турбулентным еще до того, как число Рейнольдса вырастет до 100 000, благодаря помехам — ворсу и ямкам.

Уменьшение воздушного кармана приводит к уменьшению сопротивления давления по сравнению с тем, которое возникло бы, если бы пограничный слой не был турбулентным. Смена ламинарного режима в пограничном слое на турбулентный дает колоссальный эффект — в гольфе это равносильно разнице между ударами на 70 метров и на 250! Влияние числа Рейнольдса на свойства обтекающего мяч воздушного потока показано в таблице 6.2.1.

**Таблица 6.2.1.** Влияние числа Рейнольдса на свойства воздушного потока, обтекающего мяч и другие тела

Число Рейнольдса	Пограничный слой	Спутный след	Доминирующая сила сопротивления
<2000	Ламинарный	Узкий ламинарный	Внутреннее трение
2000–100 000	Ламинарный	Широкий турбулентный	Давление
>100 000	Турбулентный	Узкий турбулентный	Давление

Задержка отрыва воздушного потока у задней поверхности заметно сказывается на скорости и дальности полета мяча во многих видах спорта, поэтому мячам часто придают такую форму, чтобы она провоцировала формирование турбулентного пограничного слоя (**рис. 6.2.8**). Пограничный слой вокруг таких мячей искусственно возмущается (**рис. 6.2.9**) еще до достижения числа Рейнольдса 100 000, при котором турбулентность наступила бы естественным образом. Различные помехи в ламинарном потоке — ворс и неровности — заставляют воздух вблизи поверхности мяча менять направление движения и создают турбулентность. Незначительное увеличение вязкого сопротивления с лихвой компенсируется уменьшением сопротивления давления. Ради этого теннисные мячи делают с ворсом, а мячи для гольфа — с «ямками» (*dimples*).

Итак, в какой степени силы сопротивления влияют на полет мяча в различных спортивных играх? Если мяч должен перемещаться в воздухе или в воде быстро, то влияют очень значительно. По мере увеличения скорости силы сопротивления существенно возрастают — как только формируется турбулентный след и возникает сопротивление давления, сила сопротивления воздуха становится пропорциональна квадрату скорости мяча. Вследствие этого бейсбольный мяч по пути к основной базе сильно замедляет свой полет, и тем выше скорость подачи, тем больше скорости теряет мяч. Мяч, брошенный со скоростью примерно 145 км/ч, по пути до базы теряет около 13 км/ч, а после крученой подачи со скоростью 112 км/ч — приблизительно 10 км/ч.

Отбитый мяч перемещается несколько лучше, потому что летит достаточно быстро для формирования турбулентности в пограничном слое, что происходит примерно при 160 км/ч. Хоум-ран становится возможным благодаря результирующему уменьшению сопротивления воздуха, однако само действие этого сопротивления сокращает дистанцию чуть ли не на 50%. Не будь сопротивления воздуха, любой высоко отбитый мяч гарантировал бы хоум-ран. Чтобы компенсировать сопротивление воздуха и послать мяч на максимально возможное расстояние, не надо отбивать его под теоретически обоснованным углом 45° к горизонтали (см. раздел 1.2). Отбитый мяч будет терять скорость, поэтому его необходимо направить чуть ниже — под углом примерно 35° к горизонтали (**рис. 6.2.10**).

Поскольку за время полета мяча в дальнюю часть поля значительная часть горизонтальной составляющей его скорости теряется, мяч, посланный битой высоко и далеко, падает вам в руки почти отвесно. Земное притяжение заставляет его двигаться вниз, но из-за сопротивления воздуха горизонтальное движение мяча вдали от основной базы почти прекращается. Кроме того, сопротивление воздуха огра-



**Рис. 6.2.10.** Сопротивление воздуха замедляет полет отбитого бейсбольного мяча, поэтому оптимальный угол при ударе битой не равен теоретическому углу 45°, показанному на **рис. 1.2.7**. Максимальной дальности полета можно добиться, если послать мяч примерно под углом 35° к горизонтали.

ничивает скорость падающего мяча, так что она не может быть больше 160 км/ч. Это конечная скорость бейсбольного мяча — направленная вниз скорость, при которой направленная вверх сила сопротивления воздуха полностью уравновешивает его направленный вниз вес и мяч движется без ускорения. Даже если вы бросите мяч из самолета, его скорость не превысит этого конечного значения (см. 5).

## Воланы и пули

Воздух не только замедляет полет сферического мяча, но и создает момент силы по отношению к асимметричным метательным снарядам. Вытянутые мячи “дыни” для американского футбола и регби нередко оказываются под влиянием аэродинамических моментов, которые действуют относительно их центров масс. Квотербек (лидер команды нападения) в американском футболе закручивает мяч не только для того, чтобы свести к минимуму сопротивление воздуха, но и чтобы аэродинамический момент не изменил траекторию мяча в воздухе и не помешал принять пас. Но если для мячей, даже вытянутых, аэродинамические моменты обычно невелики, то для метательных снарядов в других видах спорта они могут достигать очень больших значений.

Бадминтонный волан имеет одно характерное свойство — он всегда летит вперед головкой, так что оперение (“юбка”) ориентировано назад (рис. 6.2.11). К этому его вынуждает воздух, который обязательно создает большой момент силы относительно центра масс волана, если головка оказывается не спереди. Воздух способен создавать этот момент силы благодаря тому, что центр давления волана — точка приложения результирующей силы давления — не совпадает с его центром масс. Поскольку центр давления тела стремится локализоваться рядом с любой большой поверхностью, которую толкает обдувающий тело воздух, то центр давления волана находится в его широкой части, в захватывающем воздух оперении. А центр масс волана находится в его тяжелой головке, поэтому давление воздуха создает момент силы относительно центра масс волана и сообщает ему угловое ускорение. Во время полета волан всегда разворачивается головкой вперед.

Ориентированный головкой вперед волан динамически устойчив. Если он повернется по часовой стрелке, давление воздуха заставит его повернуться против часовой стрелки; стоит ему повернуться влево, давление повернет его вправо. Аэродинамический стабилизирующий эффект действует решительно и безотказно. После каждого удара ракеткой он разворачивает волан так, чтобы дальше тот летел вперед головкой, пока по нему вновь не ударят. В других видах спорта — в дартс, стрельбе из лука и метании копья — те же самые аэродинамические моменты направляют и стабилизируют движущийся снаряд. Простейшие ракеты, описанные в разделе 4.2, также достигают такой же динамической устойчивости в воздухе благодаря шестам или оперению.

Но если одни тела аэродинамический момент может стабилизировать, для других он нежелателен. Например, винтовочная пуля, вылетая из ствола, испытывает действие огромного давления на свою переднюю часть. Ее центр давления находится перед центром масс, и это делает пулю динамически неустойчивой. Без компенсирующего эффекта пуля начала бы бешено кувыркаться в воздухе и выстрел оказался бы неточным. Чтобы этого не произошло, ствол огнестрельного оружия, рассчитанного на точную стрельбу, снабжают винтовыми нарезами, которые заставляют проходящую по нему пулю вращаться вокруг горизонтальной оси. Большой момент импульса не позволяет пуле кувыркаться в воздухе, а стремительное вращение уравновешивает аэродинамические подъемные силы, благодаря чему пуля, выпущенная из нарезного оружия, летит прямо вперед.

## Крученые подачи

Сила сопротивления воздуха толкает мяч по течению набегающего потока и параллельно ему. Но иногда на мяч действуют еще и подъемные силы, приложенные перпендикулярно воздушному потоку (рис. 6.2.1). Для того чтобы возникло сопротивление воздуха, мяч должен затормозить поток, а чтобы возникла подъемная сила — отклонить его в ту или иную сторону. Хотя само название подъемной силы предполагает ее направленность вверх, на деле она может толкать мяч вбок и даже вниз.

5 Парашютистка, выпрыгнувшая из самолета, недолго будет сохранять направленное вниз ускорение. Примерно через 10 секунд она достигнет конечной скорости, с которой и продолжит падение. Конечная скорость будет приблизительно равна 200 км/ч (в зависимости от положения тела парашютистки в воздухе) и может достичь 320 км/ч, если парашютистка максимально вытянется и постарается сохранять вертикальное положение. Понятно, никому бы не хотелось врезаться в землю ни на одной из этих скоростей. Как только парашют раскроется и на него начнет действовать большая, направленная вверх сила сопротивления воздуха и/или подъемные силы, конечная скорость парашютистки упадет примерно до 18 км/ч, и она приземлится плавно и с большим изяществом.

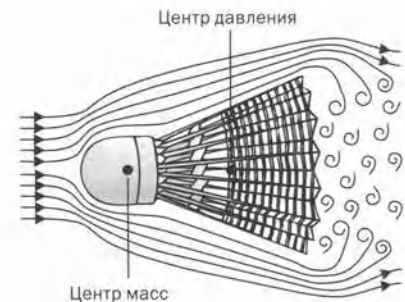
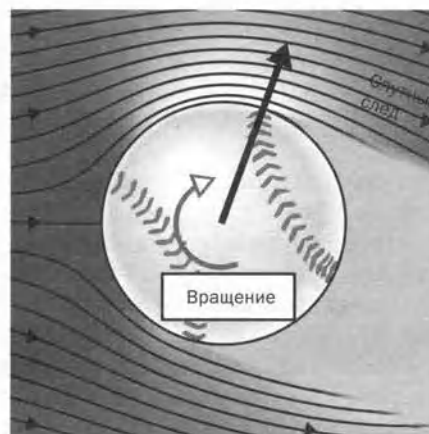
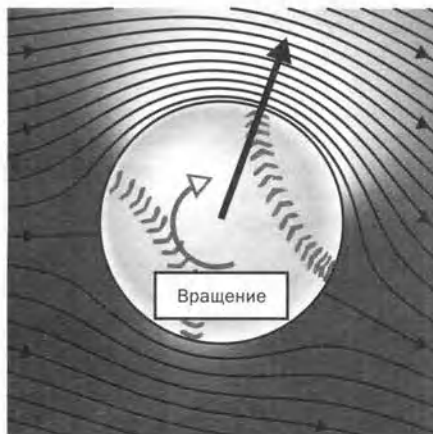


Рис. 6.2.11. Бадминтонный волан всегда летит головкой вперед, так как результирующая сила, вызванная давлением, приложена в его центре давления, на некотором расстоянии от центра масс. Если вдруг оперение случайно окажется впереди головки, сопротивление воздуха создаст момент силы относительно центра масс и вернет все на свои места.



а) Сила Магнуса

б) Отклоняющая сила



**Рис. 6.2.12.** На быстро вращающийся мяч действуют две подъемные силы, которые заставляют его поворачивать в полете. (а) Сила Магнуса возникает из-за того, что воздушная струя, которая движется рядом с мячом туда же, куда поворачивается мяч, загибается к мячу, а струя, которая движется в сторону, противоположную вращению мяча, — отходит от него. (б) Отклоняющая сила возникает из-за того, что сопутствующая вращению мяча воздушная струя дольше удерживается рядом с его поверхностью, и форма турбулентного спутного следа искажается.

В различных крученых бейсбольных подачах эксплуатируются именно подъемные силы. В этих приемах, весьма популярных в бейсболе, воздушный поток отклоняется мячом в одну сторону, а ускорение мяча направлено в другую. Не так просто заставить воздушный поток толкнуть мяч вбок. Объяснить это явление ненамного проще, но мы это сделаем.

Крученая подача заставляет мяч быстро вращаться вокруг оси, перпендикулярной направлению его движения. В зависимости от выбора оси вращения мяч свернет в ту или иную сторону. На **рис. 6.2.12** мяч закручен по часовой стрелке, если смотреть сверху. При такой ориентации оси вращения мяч отворачивает вправо относительно питчера, потому что на него действуют две направленные вправо подъемные силы. Одна из них порождается эффектом Магнуса, названным так по имени открывшего его немецкого физика Генриха Густава Магнуса (1802–1870). Вторую назовем отклоняющей силой (силой отклонения спутного следа).

Эффект Магнуса проявляется из-за того, что вращающийся мяч захватывает прилегающие слои воздуха (**рис. 6.2.12, а**). Вокруг мяча формируется устойчивая несимметричная картина — потоки воздуха, которые движутся вместе с поворачивающейся поверхностью мяча, гораздо длиннее, чем те, что движутся в противоположном направлении. Поскольку длинные слои потока большей частью изгибаются в сторону мяча, то среднее давление у этой стороны мяча должно быть ниже атмосферного. Более короткие линии потока стремятся отойти от мяча, поэтому с этой его стороны среднее давление должно быть выше атмосферного. Так как силы давления не уравновешиваются, на мяч действует сила Магнуса, направленная в сторону понижения давления (то есть в сторону питчера) и отклоняющая мяч в эту сторону. Воздушный поток отклоняется в противоположную сторону.

В ламинарном потоке на вращающееся тело действует только подъемная сила Магнуса. Но позади бейсбольного мяча образуется турбулентный след, поэтому действует еще и отклоняющая сила. Она возникает тогда, когда широкий, симметричный спутный след (**рис. 6.2.5**), который образуется при больших числах Рейнольдса, деформируется из-за быстрого вращения мяча. Если мяч не подкручен, свободно движущийся воздушный поток отделяется от мяча у его боковых сторон, симметрично относительно центра мяча. Но если мяч вращается (**рис. 6.2.12, б**), то его движущаяся поверхность толкает воздушный поток за счет вязкости. В ре-



зультате с одной стороны мяча воздушные слои отделяются медленнее, а с другой ускоряются. За мячом тянется спутный след, смещенный на одну сторону, а на мяч действует отклоняющая сила, направленная в другую сторону — к тому боку мяча, который поворачивается к питчеру. И отклоняющая сила спутного следа, и сила Магнуса посылают мяч в одну и ту же сторону.

Из этих двух сил с точки зрения крученой подачи, пожалуй, более важна отклоняющая сила, хотя обычно главную роль отводят эффекту Магнуса. Опытный питчер (подающий) умеет так послать мяч к основной базе, что его траектория отклонится сантиметров на 30 — и чем сильнее подкручен мяч, тем больше отклонение. Питчер рассчитывает таким образом обмануть бэттера (игрока с битой). Кроме того, выбрав ось вращения мяча, питчер задает направление изгиба. Мяч всегда будет отклоняться в ту же сторону, какой он был обращен к питчеру. Если питчер правша, то в зависимости от техники броска и захвата мяча тот может отклониться вниз и влево — “бросок по дуге” (*curveball*), влево по горизонтали — “скользящий” (*slider*) или вниз и вправо — “закрученный” (*screwball*).

Если питчер заставит мяч в полете вращаться назад (то есть верхняя точка мяча будет поворачиваться к питчеру), то на мяч начнет действовать направленная вверх подъемная сила. Она недостаточно велика, чтобы противостоять земному притяжению, однако может на довольно долгое время задержать мяч в воздухе, словно в прыжке. Поэтому быструю подачу с задним вращением называют “зависшей” подачей (*hanging fastball*). Мяч, поданный с высокой скоростью и относительно слабой подкруткой, падает по естественной траектории — это так называемая “тонушая” подача (*sinking fastball*), мяч летит по горизонтали вниз.

В гольфе мяч, которому клюшка сообщает сильнейшее заднее вращение, поднимает сам себя и несется над полем, словно глоссер. Профессионалы пользуются мягкими мячами — при ударе они лучше захватываются головкой клюшки и начинают более интенсивно вращаться; такой мяч удаляется от игрока под углом всего лишь  $10^\circ$  к горизонтали, но благодаря подъемной силе долго остается в воздухе. Менее искушенный игрок рискует сделать неправильный мах и придать мячу боковое вращение, исполнив слайс или хук — удар, после которого мяч отклоняется по горизонтали в ту или другую сторону относительно своей доминирующей руки. Неудачный хук может отклонить мяч в сторону на  $15^\circ$  — и отправить его прямо в лес. Чтобы застраховаться от подобных неудач, новички выбирают жесткие мячи, которые не слишком плотно захватываются клюшкой и не так сильно закручиваются. При выборе мяча новичку приходится жертвовать дальностью удара ради лучшего контроля над направлением полета мяча.

Вращение и подъемная сила имеют определяющее значение и в других спортивных играх, в том числе настольном теннисе, волейболе и футболе. Не всегда достаточно сделать прямой и сильный удар, чтобы соперник не смог его отразить. Иногда бывает полезно и закрутить мяч, так чтобы он летел по кривой и его труднее было остановить. В названии фильма “Играй, как Бекхэм” \* имеется в виду крученый удар по воротам, когда мяч летит по дуге под действием подъемных сил и его практически невозможно взять.

Впрочем, бывают и такие интересные случаи, когда поведение мяча является следствием недостаточного вращения. Например, так называемый наклбол (*knuckleball*) в бейсболе, когда мяч подается практически без подкрутки. Тут решающее значение имеют швы на мяче. Воздух в обтекающем швы потоке перемещивается, так что мяч испытывает действие боковой аэродинамической силы — подъемной силы. Мяч вибрирует на лету и вообще совершает весьма странные движения. Бросить мяч совсем без подкрутки — дело непростое и требующее тренировки. Иногда питчеры, не слишком хорошо умеющие выполнять такую подачу по правилам, тайком наносят на мяч смазку, чтобы он сам выскользнул из руки, не закручиваясь. Этот жульнический прием, называемый “плевок” (*spitball*), сильно затрудняет задачу отбивающего игрока. Точно так же может вести себя в полете старый, потрепанный мяч.

Аналоги наклбола есть и в других играх с мячом. Планирующую волейбольную подачу отбить особенно тяжело. Невозможно угадать, куда полетит мяч, а поскольку отношение площади поверхности к массе у волейбольного мяча больше, чем у бейсбольного, он легче меняет направление в полете.

\* *Bend It Like Beckham* (2002); дословный перевод названия — “Подкрути, как Бекхэм”. — Прим ред.



## 6.3. Самолеты

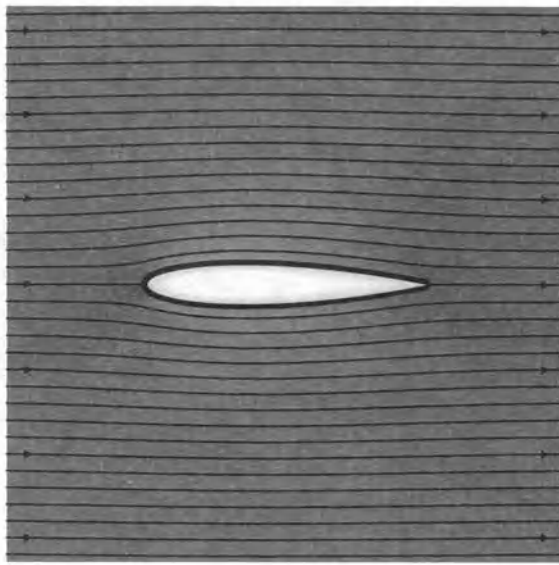
Теперь мы знаем достаточно, чтобы приступить к изучению самой хитроумной аэродинамической машины — самолета. Летящий самолет, освободившийся от контакта с землей, подвержен действию только аэродинамических сил и гравитации (будем надеяться, что именно в этом порядке). Самолет устроен весьма сложно, однако его работа опирается на те самые принципы, которые мы уже рассмотрели. Тем не менее, помимо уже знакомых вам понятий, в этой главе нам встретится и кое-что новенькое. Например, вы уже наверняка догадались, благодаря какой разновидности аэродинамической силы самолет держится в воздухе. Но вот какая сила помогает ему двигаться вперед?

### Крылья самолета; обтекаемость

Думаю, вы уже поняли, что в полете на крылья самолета действует подъемная сила, направленная вверх, и что эта сила порождается отклонением встречного воздушного потока вниз. Каждое крыло имеет аэродинамический профиль — сечение, рассчитанное таким образом, чтобы обтекающий крыло воздух действовал на него с подъемной и тормозящей силами нужной величины. Говоря точнее, каждое крыло имеет такую конструкцию и ориентировано таким образом, чтобы воздушные потоки над крылом и под ним отклонялись вниз. Поток над крылом отклоняется в сторону верхней части крыла, поток под крылом — вниз от нижней поверхности крыла. Благодаря этому отклонению вблизи крыла возникает нужный перепад давления, создающий подъемную силу, которая и держит самолет в небе.

Чтобы лучше понять, как именно крыло создает эту силу, давайте отправимся в полет. Представьте, что вы сидите в самолете, который только что начал разбег по взлетной полосе. Если смотреть из системы координат самолета (и пассажира), то воздух начинает течь мимо его крыльев. Встречаясь с передней кромкой крыла, этот воздушный поток разделяется на две струи: одна направляется сверху от крыла, а вторая — снизу от него (**рис. 6.3.1**). Эти струи продолжают свое движение, пока не сойдут с задней кромки крыла. Поскольку самолет еще не оторвался от земли, его крылья расположены практически горизонтально и обтекающий их поток воздуха прост и симметричен относительно крыла.

Так как в начале разбега крыло еще не отклоняет вниз поток воздуха, подъемная сила на него не действует — есть только сила лобового сопротивления. Но хотя эта сила толкает самолет в направлении, противоположном его движению по взлетной полосе, а значит, тормозит это движение, она необычно слаба. Позади крыла практически не возникает турбулентного следа, поэтому оно почти не ис-



**Рис. 6.3.1.** Крыло самолета имеет обтекаемую форму, и воздушный поток, обтекающий его, остается ламинарным. Сечение горизонтального крыла, показанного на этом рисунке, симметрично относительно горизонтальной оси, и воздушный поток разделяется на две одинаковые струи, обтекающие крыло сверху и снизу. Поскольку это крыло не отклоняет воздушный поток, подъемная сила на него не действует.

пытывает сопротивления, возникающего из-за разницы давлений. То небольшое сопротивление, которое оно испытывает, — это вязкое сопротивление, обусловленное трением о набегающий воздух.

Хотя почти полное отсутствие действующего на крыло сопротивления — факт довольно необычный, мы с вами воспринимаем его как нечто само собой разумеющееся. И это неудивительно — ведь мы часто наблюдаем, как предметы обтекаемой формы с легкостью разрезают воздух. Задняя часть профиля крыла сильно вытянута и заострена, что позволяет избежать срыва потока и возникновения турбулентного следа (в отличие, скажем, от не имеющего обтекаемой формы мяча).

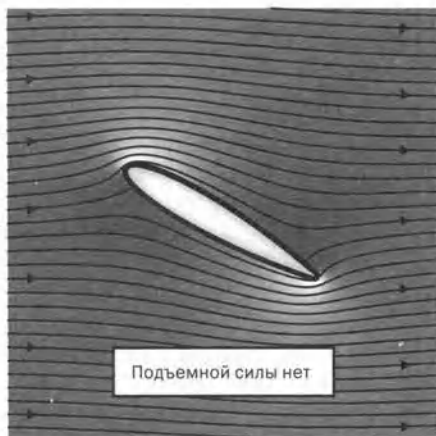
Но что именно делает крыло обтекаемым? Чрезвычайно постепенный рост давления воздуха после прохождения самого широкого места крыла. Хотя это постепенно растущее давление и толкает пограничный слой воздуха на крыле назад, в сторону, противоположную движению самолета, сила, которую создает это давление, так мала, что турбулентности не возникает. Силы трения о набегающий воздух “тащат” пограничный слой воздуха по крылу, и ему удается двигаться вперед на всей поверхности крыла вплоть до его задней кромки, при этом разрыва воздушного потока не происходит. Таким образом, позади крыла практически не возникает турбулентного следа, и оно не испытывает сопротивления давления.

## Крыло самолета и подъемная сила

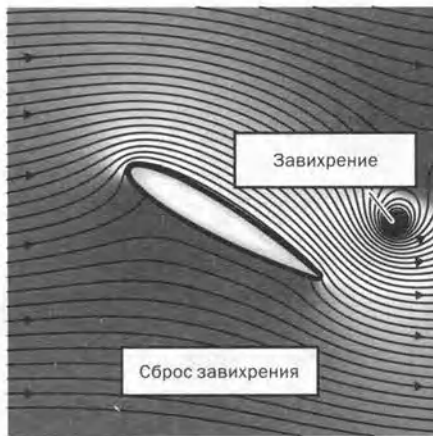
При столь малом сопротивлении воздуха самолет быстро набирает скорость вплоть до взлетной полосы. Затем пилот поднимает нос машины, и теперь крылья самолета уже не лежат в горизонтальной плоскости, так что на них начинает действовать направленная вверх подъемная сила. Когда суммарная подъемная сила становится больше, чем вес самолета, он поднимается в воздух — и вот мы уже летим!

Но давайте присмотримся поближе к моменту взлета. Если бы мы могли видеть воздушный поток и наблюдали за ним внимательно, мы заметили бы, что вокруг крыльев, которые теперь наклонены по отношению к горизонтали, начинают происходить весьма любопытные события.

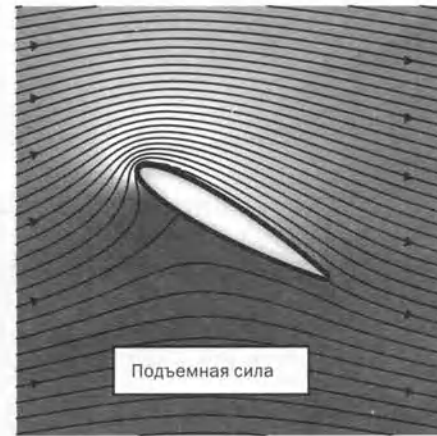
Крыло взлетающего самолета уже наклонилось, но поначалу поток сверху и снизу от крыла в целом продолжает двигаться горизонтально, хотя и приобретает необычную форму (рис. 6.3.2, а). Каждая из воздушных струй, и над, и под крылом, изгибается дважды — один раз вверх, другой вниз. Как мы видели на примере мяча, если воздушная струя изгибается в сторону объекта (в данном случае — крыла), то давление рядом с ним становится ниже атмосферного, а когда она поворачивает в сторону от объекта (крыла), то давление становится выше атмосферного. Поскольку каждая из струй изгибается одинаковым образом и в сторону крыла, и от него, то воздушный поток в целом не отклоняется, перепада давления в нем не возникает и подъемная сила в целом на крыло не действует.



а)



б)



в)

**Рис. 6.3.2.** (а) Хотя передняя кромка крыла поднята вверх, что обеспечивает ему положительный угол атаки, воздушный поток вокруг него относительно симметричен и не создает подъемной силы. (б) Завиток на задней кромке крыла нестабилен, а потому сбрасывается с крыла, образуя завихрение. (в) В результате воздушный поток отклоняется вниз, и на крыло начинает действовать направленная вверх подъемная сила.

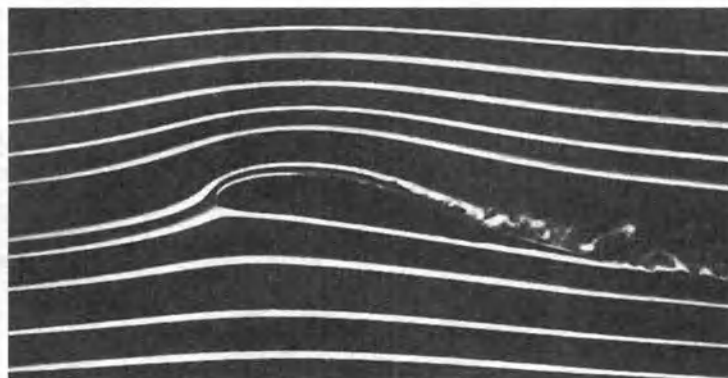
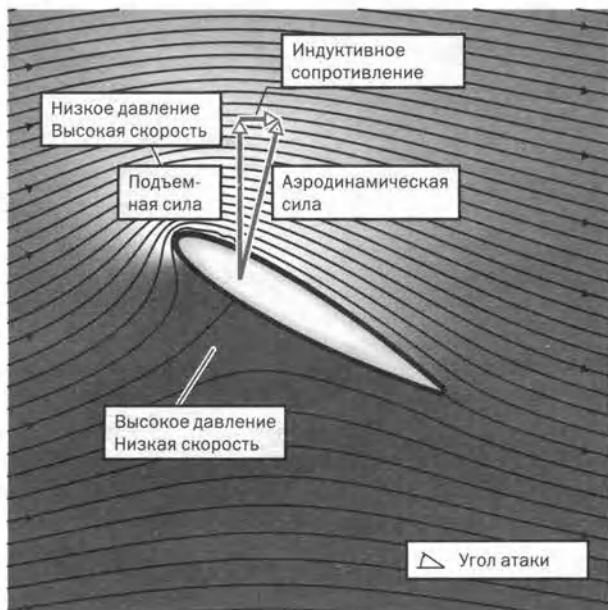
Однако нижняя воздушная струя резко загибается вверх на задней кромке крыла — там возникает своего рода воздушный завиток. Из-за инерции воздуха этот завиток нестабилен и вскоре срывается с задней кромки, образуя маленькое горизонтальное завихрение (**рис. 6.3.2, б**). После сброса этого завихрения вокруг крыла устанавливается новый, стабильный режим обтекания, при котором обе воздушные струи гладко сходят с его задней кромки (**рис. 6.3.2, в**). Аэродинамический постулат, описывающий эту картину, называется условием Кутты\* в честь немецкого математика Мартина Вильгельма Кутты (1857–1944).

\* В отечественной литературе условие Кутты называется постулатом Жуковского — Чаплыгина.

В этом новом режиме воздушная струя над крылом длиннее, чем струя под ним, и обе они отклоняются вниз (**рис. 6.3.3**). Верхняя струя изгибается в основном в направлении крыла, так что давление воздуха прямо над ним ниже атмосферного (это показано светлым пятном), а его скорость увеличена (линии воздушного потока расположены тесно). Нижняя же струя, наоборот, изгибается по большей части от крыла, поэтому давление воздуха прямо под ним выше атмосферного (более темная окраска), а его скорость уменьшена (линии расположены редко). Таким образом, давление воздуха под крылом становится выше, чем над ним, и возникает подъемная сила. Теперь воздух поддерживает ваш самолет, и вы с ним поднимаетесь вверх.

Можно посмотреть на эту подъемную силу и с другой точки зрения — как на результат отклонения воздушного потока. Воздух приближается к крылу горизонтально, а покидает его, двигаясь под некоторым углом вниз. Чтобы вызвать это отклонение, крыло должно оттолкнуть поток вниз. Поток же, в свою очередь, толкает крыло вверх, а это и есть подъемная сила. Другими словами, крыло сообщает воздуху импульс, направленный вниз, а само оно в ответ получает импульс, направленный вверх. Два этих взгляда на подъемную силу — с точки зрения закона Бернулли (согласно которому ее создает разница давлений над и под крылом) и с точки зрения закона Ньютона (согласно которому она представляет собой реакцию на придание воздуху дополнительного импульса) — абсолютно эквивалентны и равноценны.

Однако общая аэродинамическая сила, действующая на крыло, не строго перпендикулярна направлению движения воздуха, а чуть наклонена против направления движения. Перпендикулярная составляющая этой силы — подъемная сила, а горизонтальная составляющая — это новая для нас разновидность силы сопротивления: индуктивное, или наведенное сопротивление. Индуктивное сопротивление является следствием закона сохранения энергии: передавая набегающему воздуху определенный импульс, крыло вместе с тем передает ему и некоторую энергию. Воздух отнимает у крыла эту энергию, толкая его по направлению ветра с помощью индуктивного сопротивления и таким образом совершая над ним отрицательную работу. Поскольку индуктивное сопротивление нежелательно, самолет уменьшает его, используя для подъема максимальную воздушную массу. Если масса набегаю-



б)

**Рис. 6.3.3.** (а) Крыло самолета имеет такую форму и ориентировано таким образом, что обе воздушные струи, над и под ним, отклоняются вниз. В результате на него действует большая аэродинамическая сила, направленная вверх и немного назад. Ее вертикальная составляющая — подъемная сила, а горизонтальная — сила индуктивного сопротивления. (б) Маленькие струйки и завитки дыма показывают, как воздух обтекает крыло в аэродинамической трубе.

а)

щего воздуха выше, то он движется вниз с меньшей скоростью и меньшей кинетической энергией, а стало быть, уменьшается и нежелательное сопротивление, тормозящее самолет. Поскольку большие крылья получают подъемную силу от большей массы воздуха, они испытывают меньшее индуктивное сопротивление.

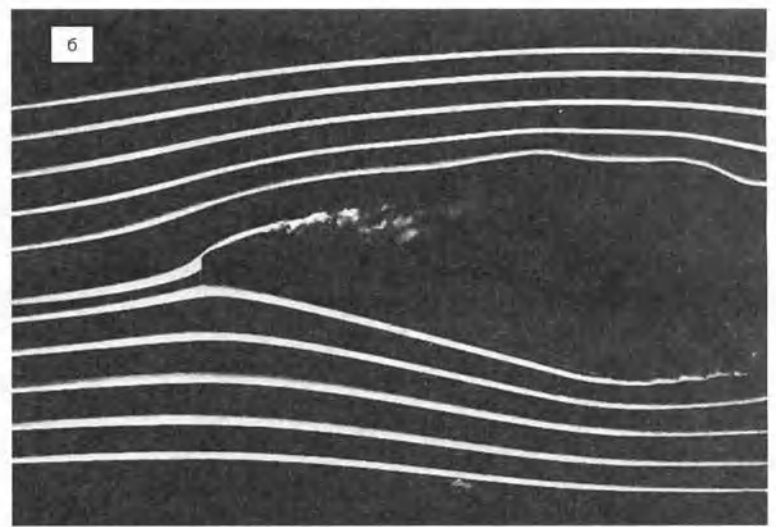
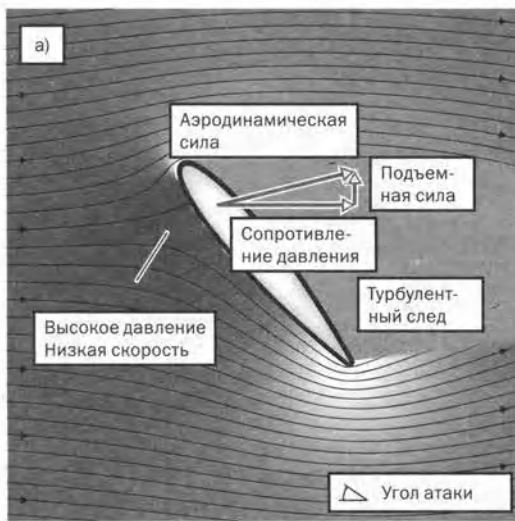
К несчастью, чем больше сами крылья, тем больше их поверхность, а значит, и вязкое сопротивление, поэтому увеличивать размер крыльев имеет смысл лишь до определенного предела. К тому же аэродинамические силы зависят от формы крыла и скорости набегающего воздушного потока, поэтому форма и размеры крыла должны очень точно соответствовать размерам фюзеляжа и летательного аппарата в целом. У маленьких винтовых самолетов, которые летают сравнительно медленно, крылья относительно большие и их профиль очерчен сильно изогнутыми линиями, причем часто асимметричными — верхняя часть крыла более выпуклая, чем нижняя. Такой профиль дает возможность максимально использовать ту ограниченную и медленную массу воздуха, с которой крыло самолета встречается каждую секунду. Реактивные военные самолеты и пассажирские лайнеры летают быстрее и ежесекундно встречают гораздо больше воздуха, имеющего к тому же более высокую относительную скорость, так что они могут обойтись и относительно небольшими крыльями с профилем умеренной кривизны\*. Чем быстрее летает самолет, тем больше максимальная высота, на которой он все еще может компенсировать свой вес подъемной силой, — это так называемый потолок полета.

Но даже при постоянной скорости полета подъемную силу, действующую на крыло, можно изменять, меняя угол атаки крыла — то есть угол, под которым крыло встречает поток воздуха. Чем больше угол атаки, тем сильнее изгибаются обе воздушные струи и тем больше подъемная сила. Поскольку крылья жестко прикреплены к фюзеляжу самолета, единственная возможность скорректировать подъемную силу — это наклонить всю машину целиком, что и делает пилот (см. ❶). Задрав нос самолета вверх, он увеличивает подъемную силу, а опустив вниз — уменьшает ее. Вот почему самолет на взлете поднимает сначала нос: в конечном счете это позволяет ему оторваться от земли.

Поскольку подъемная сила напрямую зависит от угла атаки крыла, некоторые самолеты могут летать, развернувшись вокруг продольной оси на  $180^\circ$  («вверх колесами»), — это необходимо для выполнения некоторых пилотажных фигур. На перевернутое крыло также действует направленная вверх подъемная сила, и самолет не падает. Однако такой трюк легче всего выполнить, если профиль крыла имеет одинаковую кривизну сверху и снизу. Вот почему фигуры высшего пилотажа обычно исполняют на военных и спортивных самолетах с симметричными или почти симметричными профилями крыла.

\* Этот изгиб, хорошо заметный на рис. 6.3.3, б, приводит к тому, что крылья реальных самолетов создают подъемную силу даже при нулевом угле атаки. Так что картинка на рис. 6.3.1 справедлива только для симметричного крыла.

❶ Может показаться, что корпус самолета должен быть всегда направлен примерно в сторону его ускорения, однако это вовсе не обязательно. Если бы крылья самолета могли поворачиваться вокруг своей продольной оси независимо от фюзеляжа, пилот мог бы поднимать и опускать самолет, сохраняя абсолютную горизонтальность пассажирского салона. К сожалению, сделать крылья настолько прочными, чтобы они могли поворачиваться, не рискуя отвалиться, чрезвычайно трудно, так что практически все самолеты могут наклонить крылья только вместе с фюзеляжем.



**Рис. 6.3.4.** (а) Срыв потока происходит, когда воздушная струя над крылом отрывается от его поверхности. Позади крыла формируется область турбулентности, и эффективность крыла резко падает. Подъемная сила, которую оно создает, уменьшается: среднее давление над самой толстой частью крыла становится выше, а сопротивление возрастает, потому что среднее давление над задней кромкой становится ниже. (б) Струйки и завитки дыма в аэродинамической трубе показывают, в какой момент воздух отрывается от поверхности крыла и его поток становится турбулентным.

## Ограничение подъемной силы; срыв потока

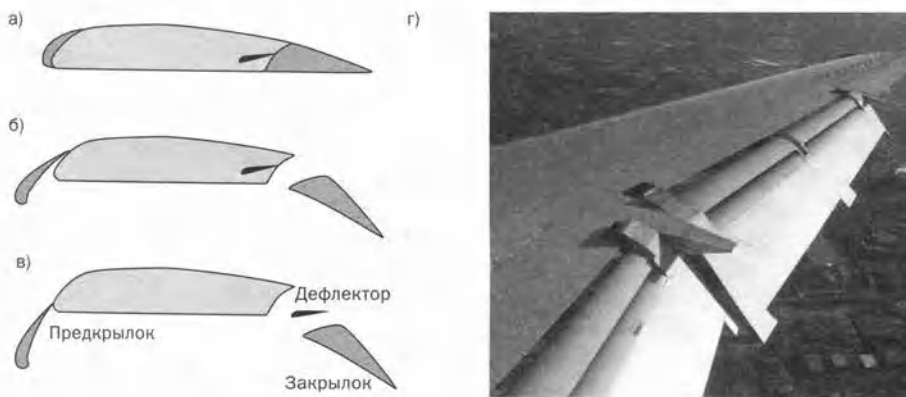
Увеличивая угол атаки, летчик может увеличивать подъемную силу лишь до известного предела, так как при этом крыло постепенно превращается из обтекаемого тела в затупленное и теперь после его самой широкой части возникает большой скачок воздушного давления. Как мы видели на примере с мячами, затупленные тела обычно разрывают воздушный поток и испытывают высокое сопротивление давления. И действительно, при определенном угле атаки воздушная струя над крылом отрывается от его поверхности — происходит так называемый срыв потока. Это случается, когда быстро растущее за самым широким местом крыла давление останавливает воздух в верхнем пограничном слое. Остановившись, этот пограничный слой отрезает от верхней поверхности крыла большую часть воздушного потока.

Под оторвавшимся от верха крыла потоком создается бурлящая область турбулентности (рис. 6.3.4). Для самолета такой срыв потока означает настоящую аэродинамическую катастрофу. Поскольку среднее давление над крылом увеличивается, крыло теряет значительную часть подъемной силы. Кроме того, появление турбулентного следа приводит к скачкообразному росту сопротивления давления. Самолет резко теряет скорость и начинает падать.

Чтобы избежать срыва потока, пилоты следят за тем, чтобы угол атаки не выходил за границы безопасного диапазона. Но возможность срыва потока означает, что существует некоторая минимальная скорость, ниже которой самолет уже не способен держаться в воздухе. Уменьшая скорость, пилот должен одновременно увеличивать угол атаки, чтобы сохранить достаточную подъемную силу. Когда скорость оказывается ниже определенной величины, то пилоту ради сохранения подъемной силы приходится наклонять крылья так сильно, что происходит срыв потока. В итоге самолет падает.

Итак, во избежание срыва потока скорость летящего самолета не может быть меньше некоторой минимальной величины — особенно это важно при взлете и посадке. У маленького винтового самолетика с сильной кривизной профиля крыла минимальная скорость настолько низка, что из-за нее редко возникают проблемы. Однако у пассажирского лайнера она составляет примерно 220 км/ч. Чтобы лайнер успел набрать такую скорость при взлете (и погасить ее после посадки), потребовались бы очень длинные взлетно-посадочные полосы. Поэтому крылья коммерческих авиалайнеров устроены таким образом, что они могут во время полета частично менять профиль. На передней кромке такого крыла выпускаются вперед и вниз предкрылки, а на задней кромке назад и вниз открываются закрылки (рис. 6.3.5). Благодаря этим элементам площадь крыла становится больше, а его профиль приобретает большую кривизну. Крыло лайнера теперь похоже на крыло маленького винтового самолета, а минимальная безопасная скорость его полета снизилась до вполне приемлемых 150 км/ч.

2 Чтобы предотвратить опасный срыв потока с крыла, авиаконструкторы снабжают крылья специальными системами, управляющими пограничным слоем. Над поверхностью крыла поднимаются узкие металлические ребра — турбулизаторы (завихрители), которые создают турбулентность в пограничном слое над крылом. Это позволяет воздуху с более высокой энергией смешиваться с пограничным слоем, помогая последнему двигаться вперед, в область растущего давления. В результате воздушные струи лучше держатся у поверхности крыла и не отрываются от нее.



**Рис. 6.3.5.** На крейсерской скорости крылья самолета обладают умеренной кривизной (а). Однако во время взлета (б) и посадки (в) на передней кромке крыльев выдвигаются предкрылки, а на задней — закрылки. Кривизна профиля крыла увеличивается, что обеспечивает более высокую подъемную силу на низких скоростях. При посадке (г) для предотвращения срыва потока к закрылкам добавляются дефлекторы, помогающие контролировать движение пограничного воздушного слоя.

Во время посадки из крыла вместе с закрылками выдвигаются еще и дефлекторы, которые перенаправляют быстро движущийся воздух из-под крыльев на закрылки. Эти воздушные струи помогают пограничному слою воздуха двигаться вдоль крыла назад и таким образом предотвращают срыв потока (еще об одном способе борьбы с этой опасностью см. ❷).

Как только шасси пассажирского лайнера касаются бетона взлетно-посадочной полосы, на верхней поверхности его крыльев поднимаются спойлеры — плоские элементы, задача которых — оторвать от поверхности крыла воздушный поток. Турбулентность, которую создают спойлеры, уменьшает подъемную силу крыла и увеличивает его сопротивление, а это не допустит случайного отрыва самолета от полосы. Иногда спойлеры пускают в ход еще до посадки, чтобы уменьшить скорость лайнера и его высоту на подступах к аэропорту (рис. 6.3.6).

В полете крыло не просто толкает встречный поток воздуха вниз — оно еще и закручивает его вблизи конца крыла. Поскольку давление воздуха под крылом больше, чем над ним, воздух стремится обтекать конец крыла снизу вверх. Самолет быстро оставляет этот воздух позади, однако он успевает приобрести большой момент импульса и кинетическую энергию.

Таким образом, законцовка каждого крыла порождает завихрение, которое тянется за самолетом на протяжении нескольких километров, подобно невидимому торнадо. Иногда — если самолет взлетает или садится во время сильного дождя или при высокой влажности — эти вихри можно увидеть. Завихрение от крыла широкофюзеляжного лайнера может перевернуть попавший в турбулентную струю маленький самолетик, а пассажиры гораздо более крупного воздушного судна испытают неожиданную встряску. Если влетаешь в такой вихрь сзади, то он действует словно горизонтальный блендер, а если попадаешь в него сбоку, то ощущение такое, словно на большой скорости наехал на “лежачего полицейского”. Каждый раз, когда такое происходит с самолетом, в котором лечу я, у меня вырывается нервный смешок.

Авиадиспетчеры внимательно следят за тем, чтобы лайнеры не пересекали вихревой след друг друга, а когда самолеты заходят на посадку один за другим, обеспечивают необходимый интервал (не менее полутора минут) между двумя посадками. На конце крыла у некоторых современных самолетов есть аэродинамические законцовки — вертикальные гребни, которые гасят эти завихрения: это необходимо как с точки зрения безопасности, так и для экономии топлива (рис. 6.3.7).

## Воздушный винт

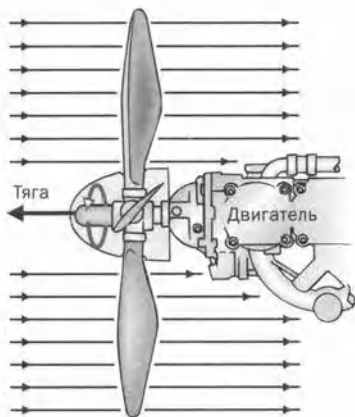
Чтобы на самолет начала действовать подъемная сила, он должен иметь определенную скорость — то есть его крылья должны обтекать воздух. Но поскольку



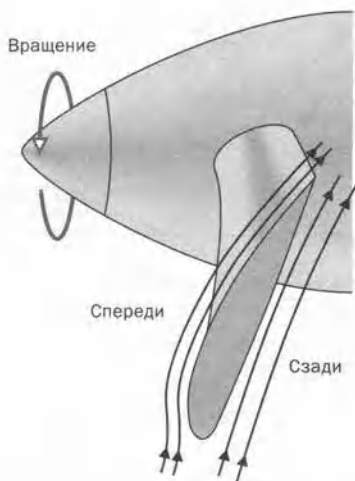
**Рис. 6.3.6.** Спойлер (аэродинамический тормоз) создает позади крыла турбулентный след. Возникающее в результате сопротивление давления отнимает у самолета энергию, помогая ему терять скорость и снижаться при заходе на посадку.



**Рис. 6.3.7.** Вертикальная законцовка мешает воздуху при обтекании конца крыла порождать в воздухе позади самолета мощный вихрь. Такие вихри приводят к напрасной потере энергии и представляют опасность для других самолетов.



**Рис. 6.3.8.** Воздушный винт ведет себя как вращающееся крыло. Когда он работает, его лопасти создают направленную вперед подъемную силу. Эта сила тянет двигатель и весь самолет вперед и поэтому называется тягой.



**Рис. 6.3.9.** При вращении лопасти винта обтекающий ее поток воздуха создает область низкого давления перед лопастью (слева) и высокого давления позади нее (справа). В результате на лопасть действует подъемная сила, которая тянет винт вместе с самолетом вперед (налево). Индуктивное сопротивление отбирает у винта энергию и стремится замедлить его вращение.

\* Некоторые одномоторные немецкие истребители времен Второй мировой войны имели крылья разной длины, чтобы возникающий крутящий момент частично компенсировал крутящий момент винта.

силы сопротивления толкают самолет назад, то при горизонтальном полете он не может сохранить свою скорость, если ничто не толкает его вперед. Вот почему у самолета есть винт или реактивный двигатель — они отталкивают воздух назад, чтобы воздух толкал самолет вперед по закону действия и противодействия.

Воздушный винт, или пропеллер, представляет собой нечто вроде усовершенствованного вентилятора — две или больше его лопастей прикреплены к центральной втулке (**рис. 6.3.8**). У этих лопастей, как и у крыла самолета, также есть аэродинамический профиль, и благодаря этому они, рассекая воздух при вращении, создают направленную вперед подъемную силу.

Когда лопасть винта рассекает воздух, в воздушных струях вокруг лопасти возникает перепад давления (**рис. 6.3.9**). Струя спереди от лопасти отклоняется в сторону передней поверхности лопасти, так что давление перед лопастью опускается ниже атмосферного; струя сзади от лопасти отклоняется от ее задней поверхности, поэтому давление позади лопасти превышает атмосферное. В результате возникает разность давлений, создающая направленную вперед подъемную силу — силу винтовой тяги.

Лопастей винта обладают тем же набором свойств, что и самолетные крылья, и это как полезные, так и вредные свойства. Тяга лопастей увеличивается вместе с их размером, кривизной передней поверхности, наклоном (то есть углом атаки) и скоростью относительно воздуха; иными словами, чем больше винт, чем быстрее он вращается и чем больше угол между его лопастями и встречным потоком воздуха, тем более высокую тягу развивает пропеллер. Сами лопасти слегка перекручены вдоль своей продольной оси, что позволяет им лучше приспособиваться к изменению скорости воздушного потока на всем протяжении лопасти от втулки до оконцовки.

И так же, как крыло, винт может перейти в режим сваливания, если воздушный поток сорвется с передней поверхности лопастей: в этом случае пропеллер, вместо того чтобы развивать тягу, будет беспорядочно месить воздух. Воздушные и судовые винты частенько вели себя подобным образом до тех пор, пока Уилбур Райт в 1902 году не разработал принципиально новую модель пропеллера (см. ❸). Братья Райт одними из первых начали изучать аэродинамику с помощью специального устройства — аэродинамической трубы, и этот методичный, научный подход к авиации позволил им совершить первый управляемый полет на аппарате тяжелее воздуха с мотором. После усовершенствований, сделанных братьями Райт, воздушные винты практически перестали испытывать сопротивление давления.

Однако на винт всегда действует индуктивное сопротивление. Когда тяга винта проталкивает самолет сквозь воздух, индуктивное сопротивление отнимает у этого винта энергию. Чтобы винт вращался с постоянной скоростью, двигатель должен совершать над ним работу. С воздушными винтами используются высокоэффективные поршневые двигатели внутреннего сгорания, похожие на те, что приводят в движение автомобили, или турбовинтовые двигатели, которые мы обсудим позже.

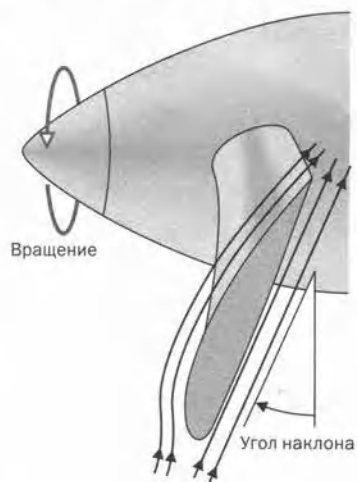
Воздушный винт не идеален — у него есть три серьезных недостатка. Во-первых, винт передает обтекающему его воздуху крутящий момент, так что воздух в ответ передает крутящий момент винту. Этот ответный крутящий момент вполне может перевернуть небольшой самолет. Чтобы устранить эту проблему, на многие винтовые самолеты устанавливают парные соосные винты, вращающиеся в противоположных направлениях, а у машин с одним пропеллером последний обычно установлен на носу, чтобы закрученный воздух, обтекая его лопасти, возвращал самолету свой момент импульса\*.

Второй недостаток пропеллера состоит в том, что его тяга уменьшается по мере роста скорости самолета. Когда самолет стоит на месте, лопасти винта рассекают неподвижный воздух (**рис. 6.3.10, а**). Но когда самолет быстро летит, встречный поток воздуха с большой скоростью налетает на те же лопасти (**рис. 6.3.10, б**). Чтобы сохранить свою тягу на более высоких скоростях, винт должен увеличить угол наклона лопастей, то есть угол атаки. Его лопасти должны поворачиваться кромками вперед, навстречу несущемуся воздуху.

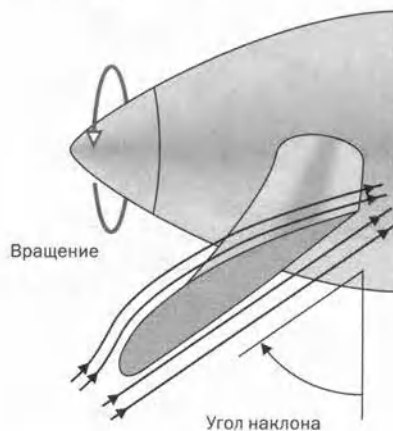
Третий и самый неприятный недостаток воздушных винтов, особенно если они установлены на самолете, рассчитанном на высокие скорости, — это их лобовое сопротивление. Чтобы справиться с воздухом, стремительно несущимся



а) Низкая скорость полета



б) Высокая скорость полета



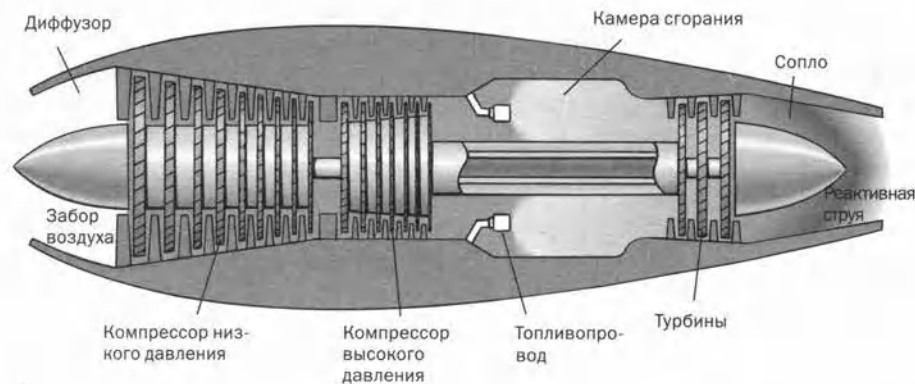
**Рис. 6.3.10.** На низких скоростях (а) лопасть винта при вращении встречает почти неподвижный воздух. Когда же скорость высока (б), воздух мчится навстречу винту, так что его лопасть должна повернуться передней кромкой ему навстречу. Угол наклона лопасти соответствует углу атаки крыла.

навстречу винту, винт и сам должен вращаться с колоссальной скоростью. Концы лопастей должны двигаться так быстро, чтобы их скорость превышала звуковую — то есть максимальную скорость, с которой в текучей среде вроде воздуха вообще может передаваться взаимодействие. Когда конец лопасти превышает эту скорость, воздух около него не успевает получить ускорение, прежде чем лопасть фактически не ударит его. Вместо гладкого обтекания в воздухе у конца лопасти образуется скачок уплотнения — узкая область высокого давления и температуры, вызванных сверхзвуковым ударом, — и лопасть теряет эффективность, переходя в режим срыва потока. Вот почему воздушные винты практически не применяются на высокоскоростных самолетах.

## Реактивный двигатель

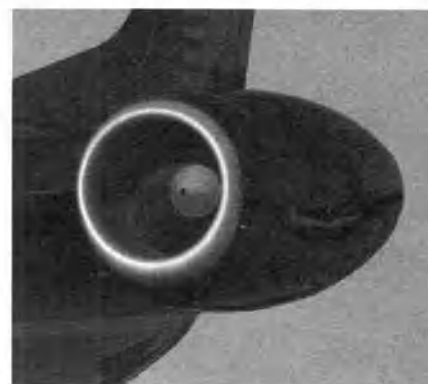
В отличие от воздушного винта, реактивный двигатель прекрасно подходит как раз для высоких скоростей. Дело в том, что винт работает непосредственно в несущемся ему навстречу воздушном потоке, а реактивный двигатель сначала замедляет этот поток до управляемой скорости, поистине чудесным образом используя закон Бернулли (с. 161).

Турбореактивные двигатели изображены на **рис. 6.3.11** и **6.3.12**. Во время полета воздух врывается в воздухозаборник (диффузор) двигателя со скоростью около 800 км/ч, то есть со скоростью движения самолета. Попав внутрь двигателя, поток



**Рис. 6.3.11.** Турбореактивный двигатель сжимает поступающий в него воздух, пропуская его через ряд веерообразных компрессорных решеток. Затем топливо смешивается с воздухом высокого давления, и эта смесь поджигается. Воздух, имеющий высокое давление и высокую энергию, выбрасывается назад, совершает работу над турбиной и покидает двигатель со скоростью, превышающей первоначальную. Таким образом, двигатель придает воздуху ускорение, направленное назад, и создает тягу, направленную вперед.

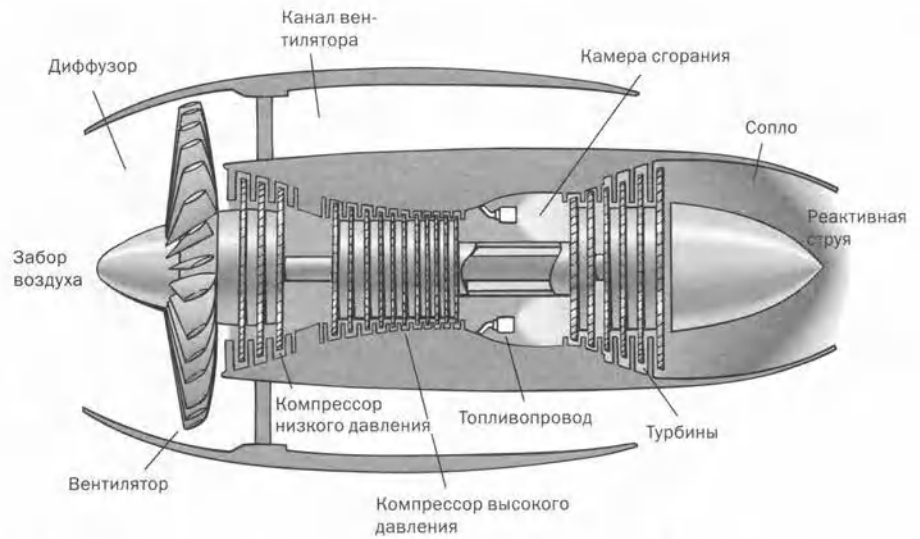
Братья Райт — Орвил (1871–1948) и Уилбур (1867–1912) — неславно первыми совершили управляемый полет на аппарате тяжелее воздуха с двигателем (1903 г.): они были превосходными специалистами в области аэродинамики. Еще в 1902 году Уилбур Райт первым пришел к догадке о том, что пропеллер представляет собой не что иное, как вращающееся крыло. До этого пропеллеры были просто вращающимися лопатками, которые в большей степени месили воздух, чем развивали тягу. Благодаря аэродинамически рассчитанному винту Уилбура и стал возможен управляемый полет, причем этот винт определял конструкцию самолетов еще в течение целого десятилетия.



**Рис. 6.3.12.** Один из турбореактивных двигателей, установленных в хвостовой части небольшого самолета местных линий.



**Рис. 6.3.14.** Турбовентиляторный двигатель под крылом большого реактивного лайнера. Обтекатель канала вентилятора (темная широкая часть двигателя) гораздо короче, чем выступающее из него блестящее сопло турбореактивного двигателя, вращающего вентилятор.



**Рис. 6.3.13.** В турбовентиляторном двигателе на вал обычного турбореактивного двигателя насажен огромный вентилятор. Большая часть воздуха, прошедшего через вентилятор, обтекает турбореактивный двигатель и сразу возвращается в атмосферу. Совершая над воздухом работу, вентилятор сообщает ему скорость более высокую, чем первоначальная. Воздух же в ответ передает двигателю и самолету импульс, направленный вперед.

воздуха затормаживается, и его давление поднимается, но полная энергия остается неизменной. Затем воздух проходит через ряд веерообразных лопаточных решеток компрессора, которые проталкивают его вглубь двигателя, совершая над ним работу и повышая как его давление, так и полную энергию. К моменту, когда воздух попадает в камеру сгорания, его давление уже многократно превышает атмосферное.

В камере сгорания воздух смешивается с топливом и смесь поджигается. Так как горячий воздух имеет меньшую плотность, чем холодный, горячий газ на выходе из камеры сгорания занимает больше места, чем перед входом в нее. Кроме того, при сгорании молекулы топлива делятся на множество более мелких частиц, что также способствует увеличению объема газа. В результате горячий газ вырывается из камеры сгорания с большей скоростью, чем входящий в нее воздух.

Когда выходящий газ продувается через похожую на ветряной двигатель турбину, его давление еще очень высоко. Он совершает над турбиной работу, которая идет на вращение принимающего воздух компрессора. Позади турбины газ высокого давления наконец ускоряется в выходном сопле и вырывается в небо при нормальном атмосферном давлении и на чрезвычайно высокой скорости.

В общем и целом турбореактивный двигатель сначала замедляет воздух, потом добавляет ему энергию, сообщает ускорение и выбрасывает назад на высокой скорости. Поскольку двигатель добавляет воздуху энергии, воздух покидает двигатель с большей скоростью, чем на входе. Увеличение направленной назад скорости воздуха означает, что двигатель толкает воздух назад, а воздух в ответ создает приложенную к двигателю силу тяги, направленную вперед. Другими словами, самолет получает импульс, направленный вперед, передавая выброшенному из двигателя воздуху импульс, направленный назад.

Однако турбореактивный двигатель менее эффективен, чем можно было бы от него ожидать. Поскольку он придает импульс относительно малому объему воздуха, этот воздух выбрасывается из него, имея чересчур большую скорость и излишнюю кинетическую энергию. Для повышения эффективности двигатель должен придавать импульс большему объему воздуха.

Эту проблему решает турбовентиляторный двигатель, в котором к реактивной турбине добавляется огромный вентилятор (**рис. 6.3.13** и **6.3.14**). Поскольку этот вентилятор расположен в воздухозаборнике двигателя, скорость воздуха уменьшается, а давление увеличивается еще до того, как он попадает в вентилятор. Затем вентилятор совершает над воздухом работу и еще больше увеличивает его давление. После этого примерно 5% этого воздуха идет в турбореактивный двигатель, а остальное ускоряется в канале вентилятора и выбрасывается наружу

при атмосферном давлении и с увеличенной скоростью. В итоге вентилятор толкает воздух назад, а воздух толкает вентилятор вперед, развивая тягу в нужном направлении.

Турбовентиляторный двигатель, как и турбореактивный, замедляет воздух, придает ему дополнительную энергию, а потом выбрасывает его назад, снова разогнав до высокой скорости. Однако турбовентиляторный двигатель пропускает через себя больше воздуха, чем турбореактивный, а потому отдает этому воздуху меньше энергии и требует меньше топлива. Огромные двигатели современных больших лайнеров — это и есть турбовентиляторные моторы (об еще одном типе турбореактивных двигателей см. ④).

## Стабилизация и управление

Чтобы благополучно добраться из пункта А в пункт Б, самолет должен сохранять устойчивость в полете, а пилот должен иметь возможность управлять машиной. Устойчивость означает, что самолет не болтается в воздухе как попало, а все время летит носом вперед. Как мы уже видели на примере бадминтонного волана, устойчивость обеспечивается положением центра аэродинамического давления относительно центра тяжести — у самолета первый должен находиться позади второго. Если это условие выполнено, то при любом нарушении ориентации самолета — скажем, он вдруг попытается перевернуться хвостом вперед, — воздух приложит к самолету крутящий момент и вернет хвост назад, на то место, где ему и полагается быть.

У большинства самолетов хвост представляет собой массивную конструкцию с тремя стабилизаторами, смысл которой — отодвинуть центр давления к задней части машины. Поскольку пассажиры внутри салона иногда перемещаются, да и ручную кладь, случается, перекаладывают с места на место, все это нужно учесть при проектировании самолета таким образом, чтобы он никогда не терял устойчивости. При установке кресел учитывают не только их вес и равномерное распределение по салону, но и следят за тем, чтобы центр тяжести самолета находился впереди его центра давления. Когда самолет входит в зону турбулентности и пассажиров просят вернуться на свои места и пристегнуться, это делается в том числе и ради сохранения устойчивости самолета: если пассажиры сидят на местах и пристегнуты, даже сильная внезапная встряска не отбросит их всех разом в заднюю часть салона.

Большинством самолетов управляют, отклоняя одну или несколько из пяти поверхностей, расположенных на крыльях и хвосте летательного аппарата. Эти отклонения изменяют ориентацию самолета и направление действующих на него аэродинамических сил. Пилот контролирует ориентацию самолета, приводя в движение управляющие поверхности трех видов: два элерона, два руля высоты и один руль направления.

Элероны — это маленькие горизонтальные элементы на задней кромке крыльев, ближе к концу крыла (рис. 6.3.15). Поворачивая штурвал, пилот отклоняет элероны в противоположных направлениях: элерон на одном крыле поднимается, отклоняя встречный поток воздуха вверх, а на другом опускается, отклоняя поток вниз. Эти потоки оказывают на крылья ответное действие, прикладывая к самолету крутящий момент. В результате самолет получает угловое ускорение и начинает вращение вдоль продольной оси таким образом, что одно крыло у него поднимается, а другое опускается. Наклонив самолет до нужного угла, пилот меняет положение элеронов на противоположное и останавливает вращение. Чтобы вернуть самолет в горизонтальное положение, он выполняет те же операции в обратном порядке: сначала заставляет самолет вращаться, а когда машина выравнивается, останавливает вращение.

Рули высоты — это две небольшие горизонтальные панели на задней кромке горизонтальных хвостовых стабилизаторов. При помощи штурвала или специальной рукоятки пилот может отклонить эти рули в определенную сторону. Если рули поднимаются, то отклоняют поток воздуха вверх, и воздух толкает хвост вниз. Нос самолета оказывается выше хвоста, машина набирает высоту. Когда рули высоты отклоняются в противоположном направлении, начинается снижение.

Руль направления — вертикальная панель на задней кромке вертикального хвостового стабилизатора, управляют этим рулем при помощи ножных педалей.

④ Прямоточные воздушно-реактивные двигатели — это турбореактивные двигатели, в которых нет подвижных частей. Поступая в такой двигатель на сверхзвуковой скорости, воздух взаимодействует с наклонными поверхностями, устроенными так, что его собственный импульс сжимает его до высокого давления. Потом в этот сжатый воздух добавляется топливо, смесь поджигается, а раскаленные продукты сгорания расширяются в сопле. Эта реактивная струя вылетает назад, толкая двигатель вместе с самолетом вперед. Хотя воздух попадает в двигатель на сверхзвуковой скорости, через камеру сгорания он проходит гораздо медленнее. Только в гиперзвуковом ПВРД смесь топлива и воздуха проходит через камеру сгорания на сверхзвуковых скоростях. Из-за этого очень трудно поддерживать горение топлива, поскольку пламя стремится вылететь из двигателя вместе с потоком отработанных газов. Пламя не может продвигаться в горючей смеси быстрее скорости звука, поэтому оно не успевает распространиться навстречу движению воздуха и выталкивается из двигателя.



Рис. 6.3.15. На задней кромке крыла, ближе к его концу, расположен широкий элерон. Хотя в данный момент элерон образует с крылом одну плоскость, его можно наклонить вверх или вниз, в результате чего на самолет будет действовать аэродинамический момент силы. Около элерона, с наветренной стороны, над крылом выдается ряд маленьких турбулизаторов. Они “взбаламучивают” пограничный слой воздуха, обеспечивая его прилегание к верхней поверхности элерона. Небольшие штифты, направленные назад от задней кромки крыла, — это рассеиватели статического электричества, которые не позволяют самолету накапливать слишком большой электрический заряд.

Когда пилот нажимает на педали, руль направления поворачивается вправо или влево, отклоняя воздушный поток в том же направлении. Воздух реагирует на это, прикладывая к самолету момент силы, и самолет начинает поворот вокруг вертикальной оси, словно офисное кресло.

Однако самолетом нельзя управлять так же, как автомобилем или катером. Если просто повернуть руль направления, то самолет начнет вращение вокруг вертикальной оси, и дальше это вращение может стать неуправляемым — не самая безопасная ситуация! Поэтому при повороте пилоты обычно наклоняют одно крыло ниже другого. Когда внутреннее крыло самолета — то, которое ближе к центру поворота, — опускается ниже внешнего, вектор общей подъемной силы, действующей на самолет, тоже наклоняется и приобретает горизонтальную составляющую. Поскольку эта составляющая направлена к центру поворота, она придает самолету нужное ускорение и заставляет его описывать дугу. При такой технике поворота пассажиры почти не замечают, что направление полета изменилось.

Однако наклон крыльев влечет за собой нарушение баланса сил индуктивного сопротивления, которое испытывают крылья: поскольку внешнее крыло работает так, чтобы действующая на него подъемная сила увеличилась и подняла его выше внутреннего, оно испытывает и большее индуктивное сопротивление. Руль направления позволяет пилоту скомпенсировать закручивание самолета, которое вызывается этой разбалансировкой сил индуктивного сопротивления (об особенностях управления некоторыми современными самолетами см. ❸).

❸ Самолету, который очень устойчив в воздухе, трудно маневрировать, поскольку такая машина в большей степени сопротивляется поворачивающим усилиям. Большие хвосты таких самолетов подвержены действию дополнительных сил вязкого сопротивления. Братья Райт специально проектировали свои самолеты неустойчивыми, чтобы увеличить их маневренность. Однако такие аэропланы так и норовили внезапно развернуться или опрокинуться в воздухе, поэтому управлять ими могли только очень искусные пилоты. В наше время некоторые военные и пассажирские самолеты тоже делают аэродинамически неустойчивыми ради увеличения их маневренности и экономии топлива. Управлять такими машинами можно только с помощью компьютеров.

## Герметизация кабины и салона

Земная атмосфера на больших высотах настолько разрежена, что на высоте 10 000 м человек без кислородной маски как минимум быстро потеряет сознание. Поэтому все современные коммерческие лайнеры герметизируются: воздух нагнетается в салон и кабину пилотов до тех пор, пока его плотность не достигнет той, какую он имеет примерно на высоте в два с половиной километра над уровнем моря. Заодно обеспечивается и изоляция от шума, который по большей части создается турбулентными потоками снаружи.

По мере роста плотности воздуха растет и его давление. Поскольку давление внутри самолета теперь гораздо больше давления за бортом, на его корпус действуют значительные направленные изнутри силы. Воздух под давлением сохраняет пассажирам здоровье и жизнь, однако при этом корпус самолета должен быть весьма прочным.

Давление внутри самолета может упасть либо из-за утечки воздуха, либо в случае отказа системы наддува. Когда давление падает, пассажиры и члены экипажа обнаруживают, что дыхание становится все менее и менее эффективным. Военных и гражданских летчиков учат быстро распознавать симптомы кислородного голодания (гипоксии), тут же надевать кислородные маски и снижаться до безопасной высоты. Как правило, падение давления развивается медленно и замечают его не сразу — совсем не так, как в голливудских боевиках.

Конечно, воздух, который нагнетается в салон и кабину, надо откуда-то взять. Единственная часть реактивного самолета, где практически постоянно имеется воздух под высоким давлением, — это компрессоры турбореактивных двигателей. На пассажирских лайнерах часть этого воздуха забирается из двигателей и подается в салон. К сожалению, при сжатии воздух так сильно нагревается, что перед подачей в салон его приходится охлаждать. Нагревание при сжатии — неизбежное следствие законов термодинамики, и мы еще рассмотрим его подробнее в восьмой главе, когда будем изучать причины детонации топлива в двигателе автомобиля. И хотя идея забирать раскаленный воздух из двигателя и охлаждать его до комнатной температуры может показаться нелепой, лучшего варианта на самом деле не существует.

## Навигация

Велосипедисты и водители автомобилей имеют возможность видеть, как ориентировано в пространстве их транспортное средство, и могут добраться до места назначения, полагаясь на дорожную разметку, дорожные знаки и другие ориентиры. Но отыскать правильный путь в небе гораздо сложнее. Если самолет поладает в облака, пилоту бывает непросто определить, в нужном ли направлении он дви-

жется, где он находится относительно пункта своего назначения и даже где верх, а где низ. Наше естественное ощущение верха и низа может подвести нас, когда мы движемся с ускорением, а самолету легко придать ускорение случайно. Каждый, кому приходилось вести самолет в облаках, знает, что почти невозможно заставить его двигаться равномерно и прямолинейно без помощи специальных приборов. В нескольких следующих абзацах мы рассмотрим пять важных приборов: авиагоризонт, гироскоп, высотомер, указатель воздушной скорости и радиоконпас. Существует также множество других не менее интересных приборов, но, я думаю, этих пяти будет достаточно и для меня, и для вас.

Пилоту, который летит в облаках или в темноте, трудно судить, насколько точно по горизонтали движется его воздушное судно и какой крен в данный момент оно имеет. Чтобы это определить, пилот пользуется прибором, который называется авиагоризонтом. Этот прибор показывает силуэт самолета на фоне условной линии горизонта. Если одно крыло настоящего самолета выше другого, самолетик на экране кренился в ту же сторону, что и настоящий. Если же нос настоящего самолета выше хвоста (то есть машина набирает высоту), то и самолетик на экране поднимается выше линии горизонта.

Поскольку воздействие ускорения и гравитации невозможно отличить друг от друга, авиагоризонт не может точно определить, где низ, а где верх, просто измерив гравитационную силу. Вместо этого он использует собственный внутренний эталон истинной вертикали, с которым постоянно сравнивает текущую ориентацию самолета. Этим эталоном служит гироскоп — диск, который вращается на практически лишенной трения оси с огромным угловым моментом. Гироскоп в авиагоризонте вращается вокруг вертикальной оси.

Поскольку момент импульса сохраняется, эта ось может изменить положение только в том случае, если на гироскоп подействует внешний момент силы. Но гироскоп укреплен в специальной рамке — карданном подвесе, изолирующем его от любых внешних моментов. Однажды закрученный вокруг определенной оси, гироскоп будет вращаться вокруг нее бесконечно. Гироскоп в авиагоризонте вращается вокруг вертикальной оси всегда, даже в облаках. Авиагоризонт сравнивает истинное положение самолета в пространстве с вертикальной осью своего гироскопа и соответствующим образом меняет положение самолетика на экране.

Пилоту сложно определить и направление движения своего самолета. Много лет назад капитаны и штурманы кораблей в океане прибегали к помощи магнитного компаса, указывающего направление на север. Но на современных самолетах предпочитают пользоваться гироскопом. Это еще один гироскоп, но вращается он вокруг оси север-юг. Гироскоп тоже укреплен в специальном подвесе, и его ось вращения тоже никогда не меняется. Гироскоп реагирует на движения самолета гораздо быстрее магнитного компаса, и вдобавок он намного точнее.

Знать, насколько высоко вы находитесь, особенно важно, если полет проходит над горами, или вокруг много других самолетов, или вы готовитесь к посадке. Для определения высоты полета над уровнем моря пилот пользуется высотомером — прибором, измеряющим давление воздуха за бортом. Поскольку чем выше вы находитесь, тем ниже атмосферное давление, по уровню давления можно довольно точно определить высоту (хотя для этого прибор еще придется откалибровать с учетом местных погодных условий). Высотомер сравнивает давление по одну сторону металлической мембраны с эталонным давлением по другую ее сторону. Разница этих создает некоторую силу, действующую на мембрану, — эту силу можно измерить, пересчитать на высоту и отобразить на циферблате или дисплее прибора.

Подъемная сила, действующая на самолет, зависит не от того, насколько быстро он движется по отношению к земле, а от того, насколько быстро он движется по отношению к воздуху. Знать воздушную скорость самолета особенно важно при взлете и при посадке. Для того чтобы ее определить, пилот пользуется приемником воздушного давления — трубкой, укрепленной в определенном месте на самолете и направленной вперед, навстречу воздушному потоку. В приемнике имеется два отверстия, одно из них расположено на переднем конце трубки, воздух встречного потока проникает в него и тут же останавливается. Давление воздуха в этой части прибора относительно высокое, поскольку вся кинетическая энергия затормозившегося потока преобразуется в потенциальную энергию давления. Второе отверстие находится на продольной стенке приемника, и встречный

воздух не врывается в него, а проносится мимо на полной скорости. Воздушное давление в этом отверстии низкое, так как практически вся энергия воздуха остается кинетической. Разность давлений, измеренных через эти два отверстия, напрямую связана со скоростью самолета относительно воздуха. Оба давления измеряются и сравниваются с помощью особой мембраны — почти так же, как в высотомере. Затем разница давлений преобразуется в показатель воздушной скорости и отображается на шкале соответствующего прибора.

Если пилот не видит земли или не может идентифицировать местность, которую видит, он не поймет, где находится. Чтобы определить свое местоположение, пилот пользуется радиоконпасом — бортовым прибором, который обрабатывает радиосигналы, отправленные с земли специальными трансмиттерами. По принятым сигналам радиоконпас определяет положение самолета относительно наземных трансмиттеров.

Трансмиттеры не посылают радиоволны постоянно и равномерно во всех направлениях. Вместо этого они генерируют серию радиолучей, описывающих окружности вокруг передатчика — как световые лучи берегового маяка. Каждый луч описывает круг, проходя с севера на восток, потом на юг, запад и снова на север пятнадцать раз в секунду. Кроме того, радиосигналы содержат информацию, по которой экипаж самолета сможет понять, когда именно луч направлен строго на север. Анализируя радиосигнал, радиоконпас определяет, где находится самолет по отношению к наземному передатчику. На практике он может определить направление от трансмиттера к самолету с точностью примерно до одного градуса.

Обработав данные нескольких наземных передатчиков, пилот может определить положение своего самолета на карте с точностью до одного-двух километров. Специальные наземные устройства — трансмиттеры VORTAC, похожие на гигантские кегли, — установлены вблизи аэропортов и вдоль наиболее оживленных воздушных трасс. Во многих случаях самолет, следуя рейсом из одного города в другой, перемещается от одного такого маяка к другому.

Самолет летит прямо к очередному трансмиттеру, пролетает над ним и продолжает полет по прямой. Всякий раз радиоконпас подсказывает экипажу, с какой стороны самолет подходит к маяку — с севера, с востока или еще под каким-то углом, — и пилот просто сохраняет это направление неизменным до тех пор, пока не пролетит над маяком. Когда самолет уходит от маяка с противоположной стороны, пилот ловит сигналы очередного трансмиттера и направляется туда прямым курсом.

Впрочем, сегодня эти радионавигационные системы, столь долго служившие авиации верой и правдой, вытесняются спутниковой системой глобального позиционирования — GPS. Эта система опирается на сеть низкоорбитальных спутников, излучающих короткие радиосигналы в микроволновом диапазоне через строго определенные временные интервалы. Измеряя время, за которое эти сигналы достигли GPS-приемника на борту самолета, можно определить, насколько далеко самолет находится от каждого из спутников, от которых он получил сигнал. Затем навигационная электроника самолета, исходя из этой информации, рассчитывает высоту и координаты воздушного судна с точностью до 20 метров в любой точке Земли.

Точность системы GPS первоначально была ограничена 100 метрами из-за специальной криптографической защиты, введенной Министерством обороны США. Это было сделано для того, чтобы другие страны не смогли использовать GPS в военных целях. Однако в 2000 году это ограничение было отменено, и точность гражданской GPS возросла примерно до 20 метров. По мере того как все больше новых элементов системы и радиочастот становятся доступными для общественности, точность системы будет расти и дальше. Тем не менее уже разработаны хитроумные способы, позволяющие даже в условиях нынешних возможностей гражданской системы GPS определять положение приемника с точностью до нескольких миллиметров.

## На скорости звука

---

В воздухе звук представляет собой возмущение плотности, распространяющееся при нормальных условиях (на уровне моря и при температуре 0 °C) со скоростью примерно 1193 км/ч (331 м/с). Более подробно мы рассмотрим звук в разделе 9.2, посвященном музыкальным инструментам, но пока нам достаточно знать, что

он состоит из волн плотности — участков сжатия и разрежения, — которые распространяются от своего источника... со скоростью звука! Звук возникает, когда по какой-либо причине нарушается однородность плотности воздуха. Если всколыхнуть ровную поверхность спокойного озера в каком-то одном месте, от этого места во все стороны побегут волны — и точно так же при нарушении однородности воздуха из места возмущения побегут во все стороны звуковые волны. Когда эти волны достигают наших ушей, мы слышим звук. И точно так же, как волнам на воде требуется некоторое время, чтобы достичь берега, звуковым волнам требуется время, чтобы добраться от своего источника до наших ушей.

От неподвижного источника звук распространяется равномерно во всех направлениях. Но если этот источник движется, картина распространения звука становится гораздо более сложной. Чтобы понять, как выглядит эта картина, посмотрим, как бегут волны по поверхности воды. Представьте, что вы бросили в озеро камень. В этом случае волны образуют ровные концентрические круги (рис. 6.3.16, а). Но если источник возмущения движется, вершины волн в направлении его движения сближаются, а позади него расходятся шире (рис. 6.3.16, б). Если же источник движется все быстрее, то и волны впереди него будут "сплющиваться" еще сильнее, пока источник не начнет их обгонять. Источник обгоняет волны, которые сам же и породил чуть раньше (рис. 6.3.16, в, г)! В этом случае узор из волн похож скорее на треугольник, чем на круг. Передние грани этого треугольника — это ударная волна. Моторные катера образуют ударную волну, когда движутся со скоростью, превышающей 15 км/ч (рис. 6.3.17).

Так же ведут себя и звуковые волны в воздухе. Поскольку звук распространяется в трех измерениях, а не в двух, как волны на поверхности воды, звуковая волна в воздухе имеет не круговую, а сферическую форму. Когда самолет летит медленнее звука, от него во всех направлениях исходят обычные звуковые волны. Но стоит скорости самолета превысить звуковую (см. 6), как звук начинает распространяться по конусу. Этот конус расширяется в направлении от самолета назад и движется вместе с ним. Внешняя поверхность конуса — ударная волна. Когда она достигает ушей наблюдателей, находящихся на земле, они слышат так называемый "сверхзвуковой хлопок".

Край конуса, ударная волна, несет в себе очень большую энергию. Эта энергия запасена в ударной волне в виде большого перепада давления по ее сечению. Из-за резкого перепада воздушного давления, возникающего в тот момент, когда ударная волна настигает вас, вы можете ощутить сильную боль в ушах, иногда "сверхзвуковой хлопок" разбивает окна. Кроме того, ударная волна способна нагревать предметы, с которыми входит в контакт, особенно обшивку сверхзвукового самолета, постоянно подвергающуюся подобному воздействию. Поэтому сверхзвуковые самолеты конструируют таким образом, чтобы они не слишком часто пересекали созданные ими же ударные волны и чтобы те поверхности само-

6 Во время Второй мировой войны некоторые самолеты приближались к звуковой скорости при пикировании, однако при этом возникала опасная вибрация и потеря устойчивости, что привело пилотов к убеждению, будто самолет не может двигаться быстрее звука. Страх перед "звуковым барьером" был развеян 14 октября 1947 года, когда американский испытатель Чарльз Йегер на ракетоплане XS-1 совершил полет на скорости, равной 1,06 скорости звука ( $M = 1,06$ ). Полет прошел настолько спокойно, что Йегер, у которого были когда-то сломаны два ребра в результате падения с лошади, заметил, что скорость звука превышена, только по бортовым приборам.

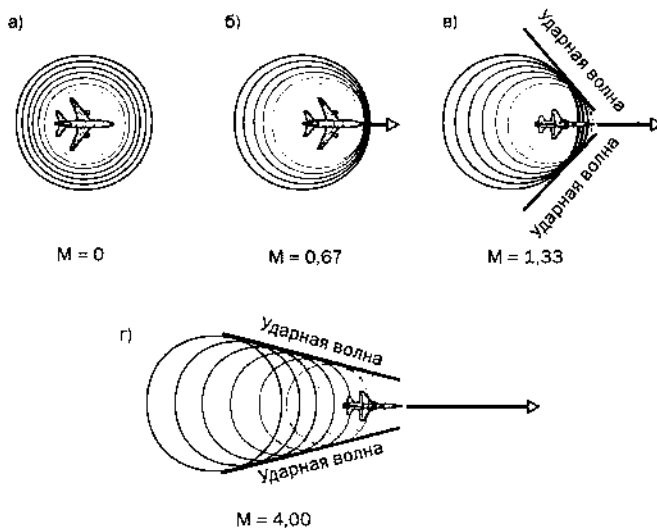


Рис. 6.3.16. (а) Если источник звуковых волн неподвижен, звуковые волны имеют правильную форму концентрических сфер. (б) Когда источник начинает двигаться, звуковые волны уплотняются в направлении движения источника. (в, г) Когда источник движется со скоростью больше звуковой, звуковые волны образуют конус, поверхность которого представляет собой ударную волну. Все скорости выражены через число Маха (число Маха, равное единице, соответствует скорости звука). Таким образом, при  $M = 0,67$  скорость составляет 0,67 от скорости звука, или около 800 км/ч.

**Рис. 6.3.17.** Этот моторный катер создает на поверхности воде позади себя треугольную ударную волну. Ударная волна образуется, потому что катер обгоняет волны, порожденные на поверхности им самим, и они тянутся за катером, приобретая треугольную форму.



лета, которые все-таки подвергаются действию этих волн, были способны выдерживать высокие температуры. Поскольку ударные волны отнимают у самолета энергию, для преодоления звукового барьера ему требуется дополнительная тяга. Конструкция сверхзвукового самолета устроена так, что потери энергии, связанные с образованием ударных волн, сведены к минимуму.

## Вертолеты тоже умеют летать

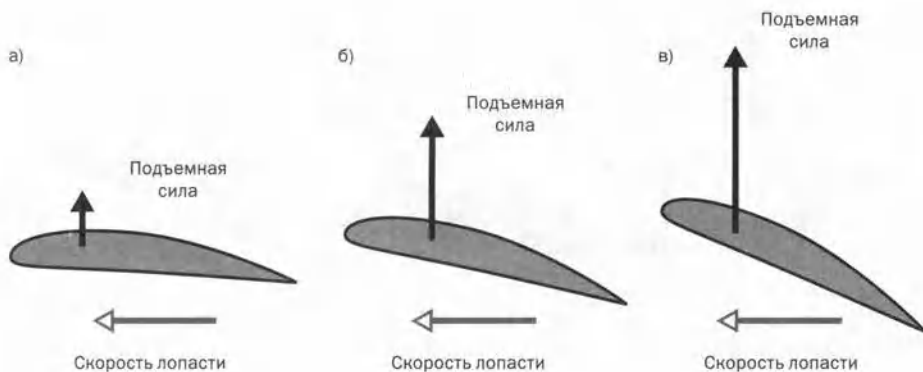
По сути дела, вертолет — это фюзеляж самолета с двигателем, подвешенный к вращающемуся в горизонтальной плоскости пропеллеру. Я уже сравнивал пропеллер с набором вращающихся крыльев — это в полной мере относится и к несущему винту вертолета. Двигатель нужен вертолету в первую очередь для того, чтобы передавать несущему винту крутящий момент, а когда винт вращается в воздухе, на него действует подъемная сила. Когда вертолет в воздухе, несущий винт всегда вращается (даже если сам вертолет неподвижен) и всегда генерирует подъемную силу. Вот почему вертолет способен взлетать и садиться без разбега, вертикально, а также зависать в воздухе.

Но мы помним, что пропеллер самолета передает крутящий момент корпусу самолета, на котором он установлен, — и в точности так же несущий винт вертолета передает крутящий момент корпусу вертолета. Если бы вертолет не компенсировал этот крутящий момент, его корпус начал бы вращаться в сторону, противоположную вращению несущего винта. По этой причине почти у всех вертолетов имеется два винта. Во-вторых, у вертолета, как правило, имеется так называемая хвостовая балка, на конце которой укреплен небольшой винт, вращающийся в вертикальной плоскости. Этот второй винт создает тягу и крутящий момент для противодействия моменту, создаваемому несущим винтом. Во-вторых, у больших вертолетов корпус подвешен сразу на двух винтах (размещенных на одной оси или на разных), которые вращаются в противоположных направлениях, и это также снимает проблему закручивания корпуса. Возможна и комбинация первого и второго вариантов.

Итак, с тем, чтобы удержать вертолет в воздухе, мы справились, но как теперь заставить его двигаться в нужную сторону? И как им управлять? Обычно эти задачи решаются изменением угла наклона лопастей несущего винта. Подъемная сила, действующая на каждую из лопастей винта, зависит от угла ее наклона (**рис. 6.3.18**). С помощью механизма, который называется автоматом перекаса, вертолет может изменять угол наклона каждой лопасти один раз за оборот. Если вертолет увеличивает подъемную силу каждой лопасти в тот миг, когда она проходит над его хвостовой балкой, то хвост получает ускорение, направленное вверх, и поднимается выше носа.

Когда вертолет наклоняется таким образом, часть подъемной силы его несущего винта направлена вперед и толкает вертолет в том же направлении. Аналогично увеличение подъемной силы лопасти в тот момент, когда она проходит над носом вертолета или сбоку от его корпуса, заставляет вертолет двигаться назад





**Рис. 6.3.18.** Лопasti несущего винта вертолета можно наклонять, меняя их угол атаки. (а) При низком угле атаки они создают небольшую подъемную силу. (б, в) С увеличением угла атаки растет и разница давлений над и под лопастью, и действующая на нее подъемная сила становится больше. Увеличивая подъемную силу каждой лопасти в определенной точке с каждым оборотом, вертолет можно наклонить, и он приобретет ускорение, направленное в сторону наклона.

или вбок. Если же пилот хочет развернуть вертолет в горизонтальной плоскости на одном месте, он прикладывает к корпусу машины крутящий момент посредством рулевого винта, меняя угол наклона его лопастей.

У летящего вертолета есть еще одна особенность, которую стоит отметить. Когда он быстро движется вперед, воздушная скорость разных его лопастей не всегда одинакова. Лопасть, которая движется вперед, в направлении к носу вертолета, разрезает воздух быстрее, чем та, что движется назад, удаляясь от его носа. Из-за разности скоростей возникает и разница в подъемной силе, действующей на вертолет справа и слева. Эта несбалансированная разница порождает крутящий момент, а он, в свою очередь, наклоняет вертолет.

Направление этого наклона противоречит нашим интуитивным ожиданиям, поскольку сейчас вступает в игру гироскопическая прецессия. Все вместе лопасти вертолета работают как гигантский гироскоп с моментом импульса, направленным прямо вверх, — при условии, что они вращаются в горизонтальной плоскости и против часовой стрелки (если смотреть сверху). Крутящий момент, созданный разницей в действующих на лопасти подъемных силах, направлен прямо назад и заставляет вектор момента импульса отклониться к хвосту вертолета. Это отклонение момента импульса влечет задираание вверх носа вертолета. К счастью, пилот ощущает этот эффект и устраняет его, корректируя угол наклона лопастей.

## Подводная лодка: полет в толще воды

Вы можете спросить меня — что подводные лодки делают в главе, посвященной воздухоплаванию? Отвечаю: я поместил их сюда потому, что они ведут себя в воде практически так же, как самолеты в воздухе. Конечно, субмарину поддерживает на плаву в первую очередь архимедова сила выталкивания, но для управления “высотой полета” (глубиной погружения) и ориентацией подводные лодки пользуются также динамической подъемной силой, а поворачивают как самолеты — наклоняя корпус. В последний раз я упоминал о подводных лодках на с. 154, когда рассказывал, как они смешивают в балластных цистернах воду и воздух, чтобы всплывать, опускаться или зависать на определенной глубине. Сейчас я расскажу, как подводные лодки сохраняют в воде правильную ориентацию и как они “летают” в ней на своих стабилизаторах-“крыльях”.

Правильная ориентация в пространстве для подводной лодки не менее важна, чем для самолета: вряд ли вам понравилось бы плыть на субмарине, перевернутой вверх дном. Даже находясь в равновесии, подводная лодка будет вращаться вокруг своего центра масс, если на нее подействует момент силы. Поскольку гравитационная сила приложена к подводной лодке в ее центре масс (в данном случае центр масс и центр тяжести совпадают), эта сила не имеет рычага, чтобы создать крутящий момент. Зато это может сделать выталкивающая сила — последняя способна даже перевернуть лодку вверх дном.

**Рис. 6.3.19.** Эта подводная лодка находится в состоянии устойчивого равновесия при вращательном движении, когда ее центр масс расположен прямо под центром плавучести. В этом случае ее вес приложен в точке, находящейся прямо под точкой опоры. Когда лодка движется вперед, ее передние и кормовые горизонтальные рули, а также вертикальный руль отклоняют обтекающую их воду и создают подъемные силы, направляющие лодку в нужном направлении.



Поскольку корабль, плавающий на поверхности воды, вытесняет собой отчасти воду, а отчасти воздух, задача определения его вращательной устойчивости сложнее, чем в случае с подводной лодкой. Как и подводная лодка, корабль находится в устойчивом равновесии при вращательном движении, если его центр тяжести (иначе говоря, вес) находится в точности под его центром плавучести (то есть точкой опоры). Однако центр плавучести корабля может смещаться, когда корабль качается на волнах, погружая в воду разные части своего корпуса. Это перемещение центра плавучести влияет на устойчивость корабля. Корабль с широким и низким корпусом обладает повышенной устойчивостью, потому что даже при незначительном наклоне смещение центра плавучести порождает большой возвращающий момент силы. Вот почему в обычной шляпке или на доске для виндсерфинга можно стоять без особого риска их перевернуть. У корпуса с закругленными обводами, напротив, центр плавучести не смещается, и повышенной устойчивостью он не обладает. Для обеспечения устойчивости центр тяжести такого корабля должен находиться гораздо ниже центра плавучести; если верх тяжелее низа, корабль опрокинется. И действительно, грузовые суда порой переворачиваются, особенно если груз на них плохо закреплен и смещается во время шторма. В XIX веке в трюмы клиперов, возивших чай из Китая, ставили тяжелые глиняные горшки — это помогало опустить центр тяжести корабля намного ниже его центра плавучести. И хотя каноэ и каяки с округлым днищем устойчивы, когда вы в них сидите, они теряют устойчивость, когда вы встаете — и таким образом поднимаете ваш с ними общий центр тяжести выше центра плавучести.

Как и другие нелокализованные силы, с которыми мы встречались (такими как вес и силы давления), выталкивающую силу можно рассматривать как приложенную к одной-единственной точке подводной лодки. Согласно закону Архимеда, эта точка (центр плавучести) находится там же, где находился бы центр масс, если бы мы заменили субмарину на порцию воды такой же формы. Вода, окружающая подводную лодку, не только выталкивает ее вверх с силой, в точности равной весу вытесненной этой лодкой воды, но еще и прикладывает эту силу в той точке, где момент силы, действующий на порцию воды, имеющей форму лодки, оказался бы равен нулю, — иначе говоря, в центре масс этой воображаемой «водяной лодки».

Истинный же центр масс подводной лодки отнюдь не обязан совпадать с центром масс воды, которую эта лодка вытесняет. Таким образом, выталкивающая сила может создать действующий на лодку крутящий момент. Этот момент заставит лодку поворачиваться вокруг поперечной оси до тех пор, пока центр плавучести корабля не окажется прямо над центром его масс (рис. 6.3.19). В этот момент лодка придет в состояние устойчивого равновесия при вращательном движении, словно маятник, подвешенный в точке над его центром масс. Если качнуть субмарину и тем самым вывести из равновесия, возникнет противодействующий момент силы, и она снова вернется в прежнее состояние.

Разумеется, подводные лодки проектируют таким образом, чтобы в горизонтальном положении ее центр плавучести располагался в точности над ее центром масс (см. 7). Но поскольку члены экипажа лодки и определенная часть ее внутреннего оборудования могут (и должны) перемещаться, то лодку в принципе невозможно сбалансировать идеально на все случаи жизни. И если ее двигатели отключены, она обязательно хоть чуточку да накренится — или в одну сторону, или в другую.

Чтобы оставаться в горизонтальном положении, подводная лодка должна двигаться. При движении носом вперед она ведет себя как некий подводный самолет: она буквально летит в воде при помощи двух пар маленьких крыльев (горизонтальных рулей) и вертикального руля. Горизонтальные рули имеют не аэродинамический, а гидродинамический профиль; два передних горизонтальных руля расположены примерно посередине корпуса лодки и выполняют те же функции, что крылья с элеронами у самолета. Два кормовых горизонтальных руля выполняют те же функции, что горизонтальные хвостовые стабилизаторы и рули высоты самолета. Наконец, вертикальный руль — вертикальное крыло с гидродинамическим профилем, расположенное на корме подводной лодки, — решает ту же задачу, что и вертикальный хвостовой стабилизатор с рулем направления у самолета.

Почти все, что я говорил об устойчивости самолета, справедливо и для подводных лодок. Чтобы поднять или опустить нос субмарины, капитан наклоняет кормовые горизонтальные рули таким образом, чтобы они отклоняли обтекающую их воду соответственно вверх или вниз. Чтобы повернуть лодку вправо или влево, капитан поворачивает вертикальный руль так, чтобы он отклонял поток воды соответственно вправо или влево. А чтобы накренить корабль на левый или правый борт, капитан отклоняет передние горизонтальные рули в противоположных направлениях.

Капитан может заставить лодку всплывать или погружаться, изменяя подъемную силу, действующую на передние горизонтальные рули. Если оба руля отклоняют поток воды вниз, то субмарина получает ускорение, направленное вверх.

Аналогичным образом, если отклонить поток воды вверх, на субмарину будет действовать сила, направленная вниз. Выполняя поворот, капитан накреняет лодку, опустив горизонтальный руль с внутренней стороны поворота и подняв руль на внешней его стороне. Тогда у подъемных сил, действующих на эти рули, возникают горизонтальные составляющие, которые придают субмарине ускорение, направленное к центру поворота. Одновременно капитан поворачивает и вертикальный руль, следя за тем, чтобы субмарина плавно вписывалась в поворот и ориентировалась носом в нужную сторону (о других судах, на которые при движении в воде действует подъемная сила (см. ②).

## Яхта: полет по волнам\*

Парусная яхта тоже движется по воде с помощью двух крыльев, причем оба эти крыла вертикальные и на оба действуют горизонтальные подъемные силы. Одно крыло — это парус яхты, находящийся наверху судна, в воздухе, а другое — киль, который погружен в воду. Хотя киль спрятан под водой и не бросается вам в глаза, это подводное крыло необычайно важно для управления яхтой. Будь у яхты один только парус, она могла бы менять курс лишь в ограниченном диапазоне направлений, двигаясь исключительно с попутным ветром. Но киль и парус вместе позволяют ей плыть даже против ветра!

Благодаря своему вертикальному положению парус отклоняет толкающий его ветер в определенную сторону, порождая подъемную силу, направленную в противоположную сторону. Киль также укреплен вертикально и точно так же отклоняет встречный поток воды, создавая еще одну горизонтальную подъемную силу. Комбинируя две эти силы, яхта может двигаться почти в любом направлении.

Давайте начнем с паруса. Встречаясь с парусом, ветер делится на две воздушные струи, которые обтекают его полотнище с разных сторон (рис. 6.3.20). В зависимости от угла наклона паруса к ветру две эти струи поворачивают либо к парусу, либо от него, создавая перепад воздушного давления. Парус надувается в ту сторону, где давление воздуха меньше, приобретая хорошо знакомую нам форму выгнутого крыла.

Воздушная струя, текущая вдоль внутренней стороны паруса, отклоняется от него, в результате чего давление воздуха повышается (темный фон), а скорость уменьшается (линии потока расходятся). Воздушная струя с внешней стороны паруса прижимается к нему, и давление воздуха здесь падает (светлый фон), а скорость растет (линии потока сближаются).

Разница давлений по обе стороны от полотнища паруса создает действующую на парус аэродинамическую силу. Она складывается из двух составляющих: горизонтальной подъемной силы, направленной от выгнутой внешней стороны паруса, и силы индуктивного сопротивления, направленной прямо по ветру. Конечно, на парус действует также и сила вязкого сопротивления, возникающая из-за трения между воздухом и тканью, а возможно, еще и сила сопротивления давления, если он порождает турбулентный след.

Парус приносит наибольшую пользу в том случае, когда создаваемая им подъемная сила намного превышает силу индуктивного сопротивления. Позволить ветру просто сносить яхту назад несложно, однако для того, чтобы двигаться перпендикулярно ему под действием горизонтальной подъемной силы, нужна сноровка. Хороший шкипер умеет поставить парус к ветру таким образом, чтобы максимально увеличить подъемную силу и минимизировать сопротивление.

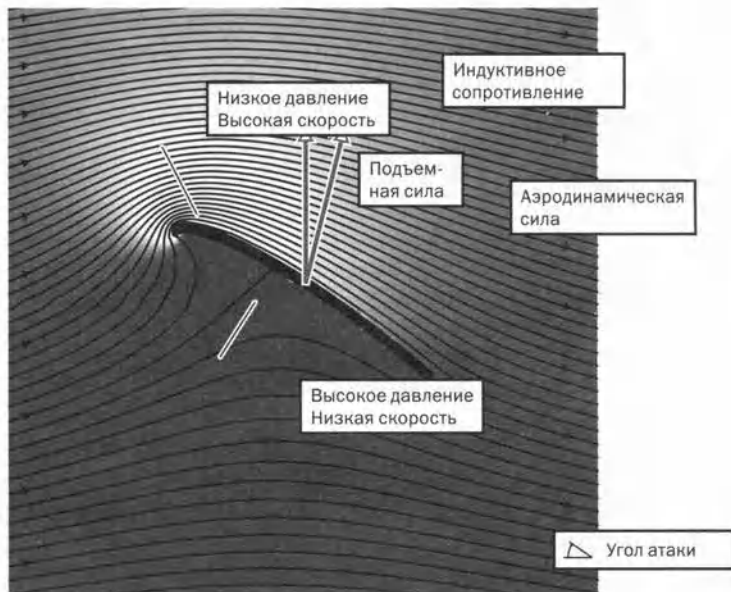
Но одна лишь эта нара сил не может двигать яхту против ветра: сила сопротивления всегда направлена вдоль ветра, а подъемная сила — перпендикулярно ему, так что аэродинамическую силу, которая толкала бы яхту навстречу ветру, взять неоткуда. Чтобы создать ее, яхта должна отклонять не только воздух, но и воду. Если яхта неподвижна относительно воды, на ее киль не действуют никакие гидродинамические силы. Но стоит ей прийти в движение, как киль начинает отклонять обтекающую его воду, порождая тем самым свою собственную подъемную силу\* \*. Направление этой гидродинамической подъемной силы определяется положением киля и направлением, в котором движется судно. Поразительно, что эта подъемная сила может быть направлена и навстречу ветру. Комбинируя действующие на парус аэродинамические силы с гидродинамическими, которые действуют на киль, яхта может идти против ветра!

\* В этом разделе автор попытался разом описать несколько различных аэродинамических явлений, в результате чего раздел получился довольно сложным для восприятия. Рекомендуем дополнить чтение этого раздела кратким и очень понятным объяснением из классической книги Я. И. Перельмана "Занимательная физика", глава "Под парусами против ветра".

③ Когда корабль стоит на месте, его поддерживает на поверхности воды только выталкивающая сила, однако судно на ходу часто использует не только выталкивающую, но и подъемную силу. Глиссеры и катера на подводных крыльях благодаря своей конструкции отклоняют встречный поток воды вниз, в результате чего на них действует подъемная сила, направленная вверх. Когда такие суда набирают большую скорость, их осадка очень невелика, и поэтому они испытывают меньшее сопротивление. Сверхскоростные гоночные катера едва касаются поверхности, практически целиком поддерживая себя с помощью подъемной силы. Катание на водных лыжах и вейкбординг тоже были бы невозможны без этой силы. То, что спортсмен сначала погружен в воду по грудь, а потом мчится на лыжах по волиам, обусловлено переходом от выталкивающей силы к подъемной. Когда вы несетесь с огромной скоростью на водных лыжах или вейкборде, проблемы плавучести вас уже не волнуют. При достаточно высокой скорости человек может кататься таким образом вообще без лыж: для получения необходимой подъемной силы ему хватает собственных ног. Подъемные силы играют важную роль и во многих не столь экстремальных видах спорта — серфинге, виндсерфинге, катании на водных мотоциклах. Когда ваш спортивный снаряд мчится достаточно быстро, на него действует заметная подъемная сила, направленная вверх, и вы поднимаетесь над водой выше, потому что уже не нуждаетесь в поддержке архимедовой выталкивающей силы.

\* \* Больше значение имеет другая функция киля: он нужен для того, чтобы яхту не сносило в направлении, перпендикулярном к килу.

**Рис. 6.3.20.** Так выглядит картина обтекания паруса ветром, если смотреть на парус прямо сверху. Ветер делится на две воздушные струи — одна течет вдоль внутренней поверхности паруса, а другая обгибает внешнюю. Внутренняя струя отклоняется от паруса, так что давление воздуха в ней повышается (темный фон), а ее скорость падает (линии потока расходятся). Внешняя струя прижимается к парусу, благодаря чему давление в ней понижается (светлый фон), а ее скорость увеличивается (линии потока сближаются). Перепад давлений создает действующую на парус аэродинамическую силу, которая складывается из двух составляющих: горизонтальной подъемной силы (тяги) и направленной по ветру силы индуктивного сопротивления.



Если бы на парус действовала только подъемная сила, производимая ветром, она толкала бы яхту строго перпендикулярно ветру и яхта двигалась бы по воде перпендикулярно ветру. И если бы на киль действовала только подъемная сила, создаваемая обтекающей его водой, эта гидродинамическая сила толкала бы яхту строго перпендикулярно направлению ее движения по воде, то есть прямо навстречу ветру. Таким образом, идеальная яхта могла бы плыть прямо против ветра.

Однако ни одна реальная яхта не способна плыть прямо против ветра, так как на нее обязательно действуют силы сопротивления. Ни вязкое, ни индуктивное сопротивление нельзя устранить целиком, да и сопротивление давления тоже в какой-то мере присутствует. Лучшие яхты могут двигаться почти против ветра, но большинство парусных судов способны ходить лишь под углом в пару десятков градусов к ветру.

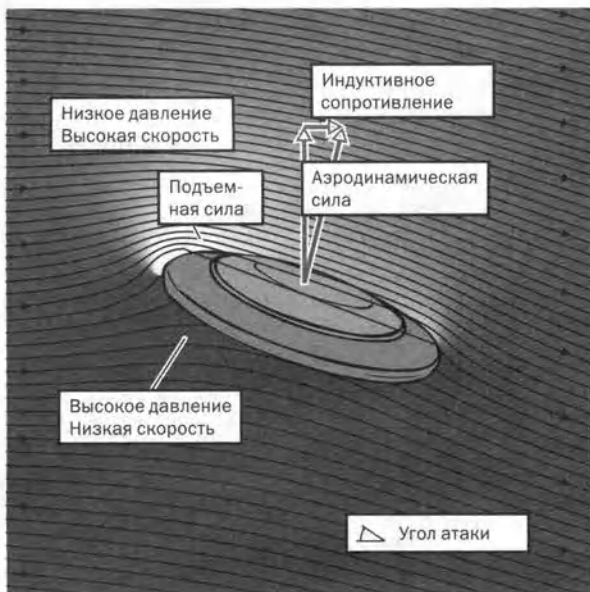
## Летающие тарелки (фрисби), летающие кольца и бумеранги

Даже если бы подъемной силы не существовало, бейсбол или гольф выглядели бы примерно так же, как и сейчас. Но игры, связанные с метанием летающих тарелок (фрисби) и тому подобных предметов, пришлось бы отменить — ведь летающие тарелки и кольца держатся в воздухе только благодаря подъемной силе, и без нее они падали бы наземь, словно камни.

Подъемная сила, действующая на фрисби, возникает благодаря форме игрушки и ее ориентации в воздухе (**рис. 6.3.21**). Летающая тарелка представляет собой крыло наподобие самолетного — это аэродинамическая поверхность, спроектированная так, чтобы обтекающий ее воздух создавал нужную подъемную силу и силу сопротивления. Благодаря своей выпуклой верхней поверхности и тому, что при правильном броске передняя часть тарелки в полете постоянно находится выше задней, запущенная фрисби демонстрирует асимметричную картину воздушного обтекания. Поскольку воздушная струя над фрисби завершается длинным поворотом к ее верхней стороне, давление прямо над снарядом должно быть ниже атмосферного. Аналогичным образом, поскольку воздушная струя, проходящая под тарелкой, описывает короткую дугу прочь от ее нижней поверхности, давление прямо под фрисби должно быть выше атмосферного.

Из-за разницы давлений на двух поверхностях летающей тарелки на нее действует аэродинамическая сила, которая толкает ее вверх и немного назад, — она складывается из большой подъемной силы, направленной вверх, и слабой силы индуктивного сопротивления, направленной назад. Подъемная сила удерживает фрисби в воздухе, а сила сопротивления понемногу замедляет ее поступательное движение.

Эта аэродинамическая сила удерживает летающую тарелку от падения, но что же не дает ей наклониться или завертеться в воздухе кувыркком? Главный ее стабили-



**Рис. 6.3.21.** Обтекая летающую тарелку, воздушный поток разделяется на две воздушные струи. Верхняя струя поворачивает к тарелке, поэтому давление над ней пониженное. Нижняя поворачивает от тарелки, поэтому давление под ней повышенное. Полная аэродинамическая сила, действующая на летающую тарелку, направлена вверх и немного по ветру — она складывается из направленной вверх подъемной силы и направленной по ветру силы индуктивного сопротивления.

лизатор — вращение. Правильно брошенная тарелка быстро вращается вокруг своей почти вертикальной оси и обладает большим моментом инерции. Пока воздух не прикладывает к фрисби момента силы, она продолжает вращаться вокруг той же оси и не опрокидывается. В реальности воздух прикладывает к качественно сделанной летающей тарелке необычайно маленький момент силы. Центр давления фрисби — точка приложения всех аэродинамических сил — находится чрезвычайно близко к его центру масс. Поскольку между центром давления и центром масс практически отсутствует рычаг, давление воздуха не может создать большой момент силы.

Когда же на летающую тарелку все-таки действует хоть какой-то крутящий момент, тарелка обычно реагирует на него прецессией. Как я уже рассказывал раньше, прецессия — это явление, при котором момент импульса вращающегося объекта постепенно смещается в ту сторону, в какую направлен приложенный к нему момент силы.

Допустим, вы бросаете фрисби таким образом, что сначала момент ее импульса направлен прямо вверх. Направить момент импульса таким образом можно либо броском бэкхенд — когда вы держите фрисби тыльной стороной ладони вперед, а потом бросаете правой рукой от левой стороны тела (если вы правша), — либо форхендом: вы держите фрисби ладонью вперед и бросаете, отведя правую руку назад. Большинство людей сначала осваивает бэкхенд, так что и вы, скорее всего, именно так и бросаете. Если теперь на фрисби будет действовать момент силы, направленный вправо, — возможно, потому что воздух слишком сильно напирал на переднюю кромку снаряда, — то момент импульса будет постепенно отклоняться из вертикального положения направо. Глядя из вашей системы координат, правая сторона фрисби начнет опускаться, и снаряд свернет вправо.

Если же вы левша и выполняете бэкхенд справа, а форхенд слева, то прецессия фрисби будет развиваться в противоположную сторону. Теперь направленный вправо аэродинамический момент силы также будет постепенно отклонять момент импульса фрисби из вертикального положения направо, но поскольку сначала этот момент импульса направлен вниз, с вашей точки зрения опускаться будет левая сторона тарелки, и фрисби свернет влево.

У некачественной летающей тарелки центр давления обычно не так точно совпадает с центром масс, и на нее действует более значительный аэродинамический момент силы. Неправильно изготовленные фрисби то и дело опрокидываются в полете, потому что воздух действует на них с большим моментом силы, быстро изменяющим направление их момента импульса. Чтобы они летели ровно, их приходится сильнее закручивать при броске.

Исключением из этого правила является игрушка аэроби, — плоское кольцо, которое летает даже лучше настоящей фрисби. Как и у летающей тарелки, центр давления летающего кольца совмещен с центром масс, поэтому оно не перевора-

чивается. У фрисби это почти идеальное совмещение достигается при помощи турбулентности, возникающей под тарелкой, а у аэроби его обеспечивает крошечный бортик на внешней стороне кольца. Из-за турбулентности тарелка испытывает гораздо большее сопротивление, чем кольцо, и поэтому улетает не слишком далеко. Если же вы выберете для игры аэроби, будьте готовы к тому, что вам придется много бегать за своей игрушкой!

Все эти особенности аэроби заставляют нас вспомнить о бумеранге. Подобно летающим тарелкам и кольцам, бумеранг держится в воздухе благодаря подъемной силе. Однако летающие тарелки и кольца делают так, чтобы аэродинамический момент силы, который действует на них в полете, был как можно меньше — тогда они летят ровно. Бумеранги же нарочно устроены так, чтобы прецессировать под влиянием крутящего момента. На правильно сделанный и правильно брошенный бумеранг действует аэродинамическая подъемная сила, направленная вверх и вбок. Кроме того, на него действует небольшой аэродинамический момент силы, который заставляет горизонтальную составляющую его момента импульса и его подъемную силу поворачиваться, описывая круг. Тогда горизонтальная составляющая этой подъемной силы действует примерно как центробежная сила, и бумеранг летит по круговой траектории. Если вы все рассчитаете правильно, то сможете играть в бумеранг с самим собой, практически не сходя с места!

## Плавание: как сдвинуть себя с места в воде

---

На суше вы продвигаетесь вперед, отталкивая землю назад. Земля реагирует на это, толкая вас вперед, и именно сила, приложенная к вам землей, придает вам направленное вперед ускорение. Но представьте, что вы неподвижно лежите на воде в спокойном озере. Как вам привести себя в движение, чтобы достичь отдаленного берега?

Если бы у вас был длинный шест, вы могли бы оттолкнуться им от дна озера: дно озера в ответ толкнуло бы вас вперед, и вы получили бы нужное ускорение. Но хотя этот способ передвижения с успехом используют на некоторых лодках, особенно при перевозке грузов и пассажиров по мелким речкам и каналам (вспомните венецианских гондольеров), сейчас он вам не поможет. Если вокруг вас только вода, вам придется заставить ее толкать вас вперед. Что ж — вы опускаете в воду руку и толкаете воду назад. Разумеется, в ответ вода толкает вас вперед, и вы приобретаете ускорение, направленное к берегу!

Мы только что видели, как работает тот же принцип действия и противодействия в случае с самолетами: самолет толкает себя вперед, отталкивая назад обтекающий его воздух. И хотя у вас и нет ни пропеллера, ни реактивного двигателя, зато есть руки и ноги. Толкая воду назад, вы получаете ускорение, направленное вперед. Если применить здесь понятие импульса, можно сказать, что вы продвигаетесь вперед, придавая воде импульс, направленный назад. Поскольку суммарный импульс сохраняется, то вы получаете такой же импульс в обратном направлении и приходите в движение.

Если бы вода в дальнейшем никак на вас не действовала, то вы двигались бы с постоянной скоростью через все озеро до самого берега. К несчастью, стоит вам поплыть по воде, как вы начинаете испытывать действие сил сопротивления, которые стремятся вас затормозить. Вам приходится усердно отталкивать воду назад, иначе вы скоро остановитесь. Чтобы ваша поступательная скорость сохранялась неизменной, вы должны отталкивать воду руками и ногами с такой силой, чтобы создаваемая при этом тяга была в точности равна направленной назад силе сопротивления, действующей на ваше тело в процессе его перемещения в воде. Если говорить об импульсе, то сопротивление постоянно отбирает у вас часть импульса, направленного вперед, и вам приходится восполнять эту потерю, отталкивая воду назад.

Итак, у нас две новости — хорошая и плохая. Хорошая новость состоит в том, что вы можете продвигаться вперед, отталкивая воду назад. Плохая — в том, что плавание требует немалых усилий. Это довольно утомительный процесс, отчасти и потому, что силы сопротивления переводят вашу мускульную энергию в тепловую, и запас вашей мускульной энергии быстро истощается. Чтобы свести к минимуму потери энергии, вы должны уменьшить действующие на вас силы сопротивления. Чтобы уменьшить силу сопротивления давления, надо по возможности

принять обтекаемую форму и стараться не создавать позади себя большой турбулентный след. Чтобы уменьшить силу вязкого сопротивления, наденьте гладкий купальный костюм и спрячьте волосы под шапочкой.

К сожалению, сопротивление — не единственное, что отнимает ваши силы во время плавания. Вода, которую вы отталкиваете назад, тоже уносит с собой часть вашей энергии. Конечно, вы должны придавать воде импульс, направленный назад, чтобы получить от нее импульс, направленный вперед, но зачем отдавать ей энергию? К счастью, у вас есть возможность до некоторой степени контролировать количество отдаваемой воде энергии, и вы можете попытаться отдать ее поменьше.

Сопротивление ежесекундно сообщает вам некоторый направленный назад импульс и снижает вашу скорость. Вы продвигаетесь вперед, передавая этот импульс воде, которую также отталкиваете назад. Чтобы плыть с максимальной эффективностью, вы должны передать этот импульс как можно большему количеству воды, тогда эта вода будет двигаться назад медленно, а значит, со сравнительно малой кинетической энергией. Большая масса воды, движущаяся назад медленно, обладает меньшей кинетической энергией, чем малая масса воды, движущаяся назад быстро, даже если величина импульса у них одинакова. Это объясняется тем, что импульс воды пропорционален ее скорости, а кинетическая энергия — скорости в квадрате. По этой причине вам выгоднее толкать назад больший объем воды медленно, чем меньший быстро, — сила на вас будет действовать одинаковая, а энергии вы в первом случае потеряете меньше.

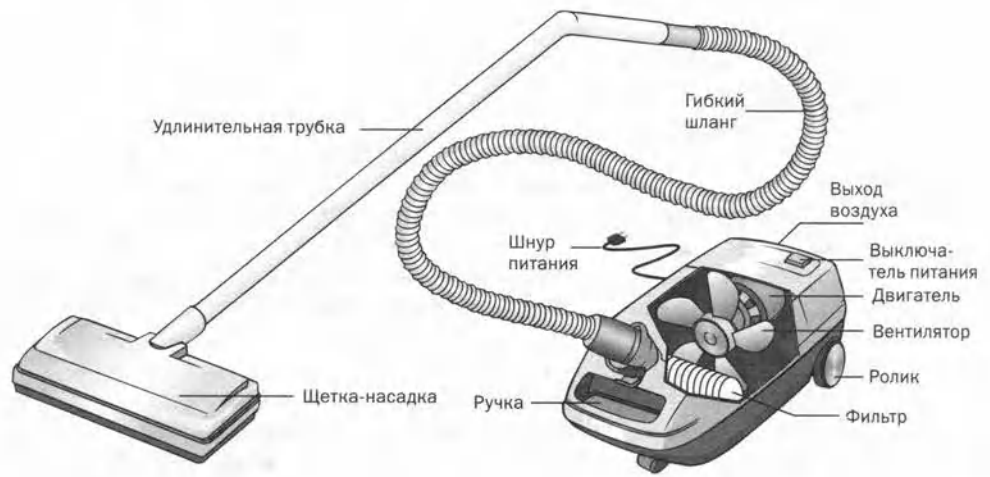
Отчасти искусство пловца состоит в том, чтобы отталкивать большие массы воды прямо назад с умеренной скоростью, а не месить воду вокруг себя, посылая ее назад под разными углами и на высоких скоростях. Овладев этим искусством, вы сможете придавать воде нужный импульс, не отдавая ей много энергии. И когда вы плаваете с маской и трубкой, продвигаясь вперед в основном при помощи ног, вам очень пригодятся ласты — они как бы увеличивают поверхность ваших ног, позволяя вам отталкивать назад больше воды с невысокой скоростью и таким образом экономить свою энергию.

Я всегда изумляюсь, видя, как хороший пловец обгоняет меня со скоростью вдвое большей, чем моя. Чтобы понять мое изумление, вы должны осознать, что именно делает этот человек. Во-первых, сила сопротивления давления примерно пропорциональна скорости в квадрате: если вы плывете вдвое быстрее кого-то, то каждую секунду вы встречаете в два раза больше воды и оставляете ее позади себя в турбулентном следе, где она движется вдвое быстрее, чем раньше. Но дважды два — четыре, а значит, передаваемый воде импульс вчетверо больше. Стало быть, вчетверо увеличивается и сила сопротивления. Итак, пловец, который плывет вдвое быстрее меня, при прочих равных преодолевает вчетверо большую силу сопротивления. Мало того, каждую секунду этот спортсмен преодолевает и вдвое большее расстояние и поэтому совершает против силы сопротивления давления в восемь раз большую работу. Таким образом, развиваемая им мощность в восемь раз превосходит мою. Конечно, я не то чтобы выдающийся атлет, но все же такая наглядная демонстрация превосходства в грубой силе меня подавляет.

На самом деле секрет хорошего пловца во многом кроется в эффективности его действий. Я молочу по воде руками как бог на душу положит, а он толкает ее назад аккуратно и рационально. Вдобавок спортсмен минимизирует сопротивление давления, оставляя за собой гораздо менее выраженный турбулентный след. Когда-нибудь я тоже освою все эти приемчики и стану хорошим пловцом. Пока же мне остается только писать о них.

Моторные лодки тоже продвигаются вперед, отталкивая воду назад. Они тоже работают наиболее эффективно, когда отталкивают прямо назад большие массы воды. Обычный моторный катер отталкивается от воды гребным винтом. Во время вращения винт сообщает окружающей воде ускорение, направленное назад. Она в ответ толкает винт вперед, и катер получает направленное вперед ускорение. Как и у пропеллера на самолете, лопасти современных гребных винтов представляют собой вращающиеся крылья, спроектированные с учетом аэродинамических закономерностей, поэтому их коэффициент полезного действия достаточно высок (см. ❷).

❷ Подводные лодки, как и моторные катера, создают направленную вперед тягу с помощью гребных винтов. В свое время эти винты производили столько шума, что субмарину было слышно под водой за много километров. Проблема заключалась в том, что обычные винты создают не только турбулентность, но и кавитационные полости — пустоты в воде, которые затем резко схлопываются с большим шумом. В целях устранения этого шума на современных подводных лодках устанавливаются очень хитроумно рассчитанные винты, которые максимально уменьшают турбулентность и практически исключают кавитацию. Вода обтекает все поверхности таких винтов гладко и ламинарно, без разрывов потока. У этих совершенных винтов настолько сложная форма, что изготовить их можно лишь на особых станках с компьютерным управлением.



## 6.4 Пылесосы

В разделе 6.1, посвященном поливу сада, мы говорили о средствах, которые позволяют нам выпустить поток из шланга. В этом разделе мы будем рассматривать обратную ситуацию — устройство, которое втягивает поток в шланг. Такое устройство называется пылесосом, а вещество втягиваемого им потока — не что иное, как воздух. Движущийся воздух подхватывает пыль и мелкий мусор, направляя их в пылесборник, что делает пылесос чрезвычайно полезным предметом обихода.

### Как пылесос затягивает воздух

Для сбора пыли пылесос использует быстро движущийся воздух. Для того чтобы понять, как устроен пылесос, надо выяснить, каким образом он создает воздушный поток и почему пыль так легко уносится вместе с этим потоком. Однако отвлечемся на время от пыли и посмотрим, как сам воздух попадает в пылесос. В частности, рассмотрим движение воздушного потока в пылесосе, который состоит из гибкого шланга, а также пылесборника и мотора, размещенных в общем корпусе.

Чтобы упростить картину, я оставляю в этой машине только основные части — шланг и вентилятор, который гонит через шланг воздух (рис. 6.4.1). Вне шланга давление воздуха всегда атмосферное. Когда вы включаете вентилятор, давление в шланге падает и создается частичный вакуум (именно поэтому пылесос по-английски называется “вакуумный чистильщик” — *vacuum cleaner*). Воздушный поток обычно направлен из области высокого давления в область разрежения, поэтому наружный воздух устремляется в шланг и засасывается в его отверстие. Природа не терпит пустоты.

Через одну-две секунды в шланге устанавливается ламинарный режим потока, и мы вправе применить закон Бернулли для расчета давления и скорости воздуха в любой точке потока. Однако мы не можем с помощью этого же уравнения сравнить параметры воздушного потока до и после прохождения вентилятора, так как закон Бернулли требует, чтобы препятствие было неподвижным, а вентилятор, как нетрудно заметить, вращается. Главное здесь то, что вентилятор совершает над воздухом работу, а следовательно, повышает его полную энергию. Но мы можем с помощью закона Бернулли адекватно оценить состояние потока в шланге до его попадания в вентилятор.

Ваш пылесос постоянно работает на одной и той же высоте над уровнем моря, поэтому потенциальная энергия в поле сил тяготения не играет важной роли, и можно ожидать, что вдоль линии потока сумма потенциальной энергии сил давления и кинетической энергии воздуха будет постоянной. Теряя давление вдоль линии потока, воздух набирает скорость; по мере роста давления скорость

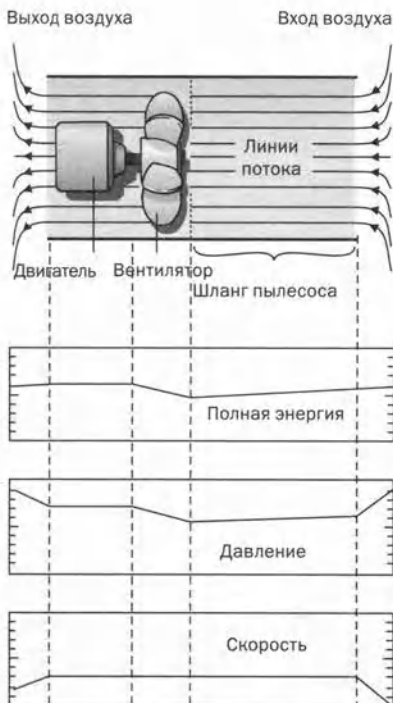


Рис. 6.4.1. Когда воздух втягивается во входное отверстие шланга, его давление падает, а скорость увеличивается. Вентилятор резко повышает полную энергию воздуха, помогая ему компенсировать потери энергии из-за вязкости, так что воздух может вернуться в окружающую среду через выходное отверстие.



падает. Поскольку в толще потока в шланге давление низкое, воздух устремляется к входному отверстию и его скорость растет по мере понижения давления (рис. 6.4.1). Входное отверстие ведет себя как сопло, хотя внешне на него и не похоже — линии попадающего во входное отверстие воздушного потока уплотняются, и его скорость увеличивается. Одновременно падает давление воздуха.

Оказавшись в шланге, воздушный поток низкого давления на большой скорости продвигается к вентилятору. Задача вентилятора — повысить полную энергию воздуха, как для того, чтобы он быстрее вышел наружу, так и для того, чтобы восполнить потери энергии из-за похожих на трение явлений в шланге. Чуть позже мы узнаем, что это за явления и как вентилятор с ними борется.

Диаметры входного и выходного отверстий одинаковы, поэтому при прохождении через вентилятор скорость воздуха не может измениться — в зависимости от того, замедляется или ускоряется поток, давление воздуха соответственно растёт или понижается. Однако давление и обусловленная силами давления потенциальная энергия увеличиваются. На вентилятор поступает по шлангу воздух с низким давлением, а покидает вентилятор через выходное отверстие воздух с высоким давлением. Таким образом, вентилятор поддерживает равновесие между давлением в шланге и на выходе из пылесоса. Именно низкое давление в шланге заставляет воздух двигаться!

Хотя давление воздуха на выходе из вентилятора все еще ниже атмосферного, кинетическая энергия его велика. На выходе линии потока расходятся (рис. 6.4.1). Выходное отверстие работает как диффузор, что дает возможность линиям потока разойтись дальше друг от друга, так что скорость потока снижается, а давление в нем растет; кинетическая энергия воздуха превращается в потенциальную энергию давления. В конце концов давление воздуха уравнивается с атмосферным, и он, пройдя выходное отверстие, смешивается с воздухом комнаты. Воздушный поток завершил свой путь по пылесосу.

Но если надеть на шланг узкую щелевую насадку (рис. 6.4.2), картина потока станет более сложной. Для того чтобы воздух мог пройти через вентилятор с прежней скоростью, он должен очень быстро миновать узкую щель насадки. Линии потока сильно уплотняются, скорость резко возрастает, а давление падает.

Резкое увеличение скорости и уменьшение давления при прохождении устойчивого потока через сужение в трубе называется эффектом Вентури — в честь его первооткрывателя, итальянского физика Джованни Вентури (1746–1822). Эффект Вентури — это частный случай эффекта Бернулли, он гласит, что повышение скорости потока сопровождается падением давления в нем.

## Пыль и сопротивление воздуха

Теперь, когда мы разобрались со скоростью и давлением воздуха в пылесосе, пришла пора разобраться с пылью. Устремляясь в насадку на шланге, воздух увлекает за собой пыль. Это явление называется уносом — какая-то часть одного потока уносится вместе с другим потоком. При очень высокой скорости воздух эффективнее уносит пыль, поэтому ковер легче вычистить щеткой с узкой щелью, чем с широкой.

Частицы пыли уносятся воздухом благодаря вязкому сопротивлению. Неважно, летит ли пыль по воздуху или воздух проходит через слой пыли, действие сил вязкого трения в обоих случаях направлено на то, чтобы пыль покоилась относительно воздуха. Мелкие частицы пыли не могут спровоцировать турбулентность в воздушном потоке, поэтому сопротивление давления отсутствует; число Рейнольдса для воздуха, обдувающего пылинку, очень мало, и поток остается ламинарным.

Сила вязкого трения, с которой воздух действует на пылинку, пропорциональна диаметру пылинки и разности скоростей пылинки и воздуха. Эта зависимость вытекает из того, что количество воздуха, которое трется о частицу пыли, пропорционально ее диаметру (или обхвату) и скорости движения в воздухе. Сила вязкого трения, действующая на частицу пыли, обычно направлена так, чтобы скорость частицы сравнялась со скоростью воздуха. Более того, частица отталкивает воздух с силой, равной и противоположной силе вязкого трения.

Пылинки нередко представляют собой микроскопические кусочки камня. Вправе ли мы предположить, что сопротивление вязкости должно воздей-

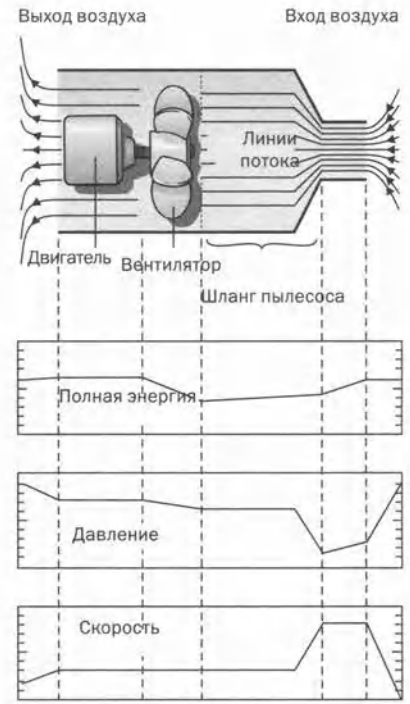


Рис. 6.4.2. Когда вы присоединяете к шлангу щелевую насадку, входящий воздух развивает очень большую скорость при относительно низком давлении. Узкий канал насадки должен быть коротким, чтобы потери энергии из-за вязкости были минимальными.

вать на булыжник и на пылинку одинаковым образом? Нет, это не так. Вопрос в том, насколько велика сила сопротивления по сравнению с весом и массой тела. Несмотря на то, что пылинка испытывает гораздо меньшее вязкое сопротивление, чем то, что действует на более крупный камень, она реагирует на эту силу гораздо более активно.

Это происходит потому, что сила вязкого сопротивления пропорциональна диаметру тела, а его масса и вес — кубу диаметра. Представьте себе, сколько пылинок вы получите, если разотрете в порошок даже небольшой камешек, и вообразите, насколько мало будет весить одна пылинка. Этот вес слишком мал для того, чтобы удержать пылинку на месте, однако у пылинки достаточно большая поверхность для того, чтобы активно взаимодействовать с воздушными потоками, — неудивительно, что вязкое трение легко увлекает за собой пыль!

Воздействие окружающего воздуха на частицы пыли так велико, что воздушный поток легко поднимает их. Ветер далеко разносит пыль, попавшую в атмосферу из заводских труб, и вулканический пепел, который может держаться в воздухе целыми днями, неделями, а то и годами. В 1980 году, после извержения вулкана Сент-Хеленс в штате Вашингтон, ветер развеял пепел по всему Среднему Западу США и принес его на Восточное побережье.

Пыль стремится осесть на землю, но силы вязкого сопротивления мешают ей опуститься быстро. Как и любое тело, падающее в атмосфере, пылинка имеет конечную скорость, при которой направленная вверх сила сопротивления в точности уравновешивает направленный вниз вес. Из-за большого соотношения площади поверхности и веса частицы пыли ее конечная скорость может составлять 1 мм/с и меньше. Следовательно, любой направленный вверх воздушный поток вернет ее в небо. В комнате без сквозняков, на солнечном свету, можно видеть витающую в воздухе пыль, которой не дают опуститься обусловленные вязкостью силы сопротивления.

Та же самая сила вязкого сопротивления затягивает пыль в пылесос. Эта сила действует так, чтобы разность скоростей воздуха и пыли уменьшалась, поэтому если воздух быстро уйдет в пылесос, пыль сделает то же самое. Чем быстрее движется воздух, тем больше сила вязкого сопротивления, приложенная к пылинке. Тот факт, что с узкой насадкой пылесосить легче, чем просто с открытым шлангом, объясняется увеличением силы сопротивления с ростом скорости воздуха — вблизи насадки воздух движется быстрее, и силы вязкого сопротивления тоже больше.

К сожалению, из-за вязкого трения скорость воздуха вблизи поверхности ковра или пола тоже снижается. У самой поверхности трудно сохранить высокую скорость воздуха, так как в этой зоне формируется пограничный слой медленно движущегося воздуха. Чтобы удалить с ковра пыль, плотно вбитую в ворс, нужны мощный вентилятор и высокая скорость воздушного потока, которая достигается за счет пропускания воздуха через узкую щель насадки. Именно по этой причине пылесосы на батарейках не способны на полноценную уборку: их слабые вентиляторы не могут как следует разогнать воздух, чтобы эффективно удалить пыль, особенно в непосредственной близости от поверхности. Извлечь пыль из пограничного слоя удастся с помощью насадок-электрощеток, которые используют инерцию для того, чтобы оттеснить пылинки от поверхности, вытащить их из пограничного слоя и направить в быстрый воздушный поток, а вместе с ним — в пылесос.

Теперь нам ясно, как пылесос собирает пылинки. А что же происходит с более крупными частицами? Попробуйте затянуть в пылесос стеклянный шарик, и вы быстро поймете, что действующая на шарик сила вязкого сопротивления слишком мала и не способна его поднять. После нескольких неудачных попыток вы, скорее всего, просто возьмете шарик рукой и забросите его в шланг.

Вес стеклянного шарика слишком велик относительно силы его взаимодействия с воздухом. Он достаточно большой для того, чтобы возникло сопротивление давлению; число Рейнольдса для стеклянного шарика значительно превышает число Рейнольдса для пылинки, и в воздухе позади него формируется турбулентный след. Но несмотря на сопротивление давлению, воздушный поток не в силах затянуть в пылесос тяжелый шарик. Что ж, в конце концов, мы купили эту машину для сбора пыли, а не стеклянных шариков!

## Вентилятор

Как пылесос собирает пыль, мы выяснили, теперь посмотрим, как работает его вентилятор. Не будь вентилятора, силы вязкого трения вскоре превратили бы полную энергию проходящего по шлангу воздуха в тепловую и остановили бы поток. С узкой насадкой эффект был бы еще заметнее, потому что через насадку воздух движется с очень высокой скоростью и теряет полную энергию еще быстрее. Но и в длинном и не слишком толстом шланге теряется много энергии, поэтому чересчур длинные шланги уборочных грузовичков-пылесосов отнюдь не способствуют наведению безупречной чистоты на улице.

Для того чтобы воздух продвигался по шлангу, вентилятор перекачивает его из области низкого давления (в шланге) в область высокого давления (на выходе из пылесоса), то есть против естественного направления потока (рис 6.4.3). Вентилятор совершает работу над воздухом, возмещает потери энергии, которая под действием вязкого трения перешла в тепловую, и добавляет еще какое-то ее количество для увеличения скорости выходящего из пылесоса воздуха. Поскольку вентилятор повышает полную энергию воздуха, через него проходит неустойчивый воздушный поток; давление воздуха, который проходит через вентилятор, повышается без соответствующего снижения скорости.

Вентилятор — это, по сути дела, набор крыльев-лопастей, пропеллер. Движущиеся лопасти совершают работу над воздухом, используя энергию, которую электрический двигатель вентилятора получает от источника питания. Любопытно, что эта работа совершается при вращательном движении, а не при поступательном, которое обычно ассоциируется у нас с понятием работы. Я уже не раз обходил стороной этот момент, но сейчас обращаю на него внимание. Мы знаем, что, если вы приложите к телу силу так, чтобы под действием этой силы оно переместилось на какое-то расстояние, вы совершите работу. Но работа совершается и в том случае, когда на тело действует момент силы и оно поворачивается на какой-то угол в направлении этого момента.

Величина работы, которая при этом совершается, равна произведению момента силы, действующего на тело, на угол поворота в направлении момента, или:

$$\text{работа} = \text{момент силы} \times \text{угол поворота} \quad (6.4.1)$$

В этом уравнении угол поворота измеряется в направлении действия момента силы. Если тело поворачивается в противоположном направлении, оно совершает работу над вами! Чтобы рассчитать работу, которую вы совершаете при вращении чего-либо, надо измерить угол поворота в естественных единицах — радианах. Один радиан равен  $180/\pi$  градусам (примерно  $57,3^\circ$ ). Градусы вам привычнее, чем радианы, но если вы подставите в уравнение 6.4.1 угол в градусах, результат будет неверным.

Почему работа равна произведению момента силы на угол (в радианах), понять несложно. Представьте себе, что вы крутите педали велосипеда — работа, которую вы совершаете над педалью, равна произведению силы, с которой вы действуете на педаль, на перемещение педали в направлении этой силы. Раз педаль перемещается по кругу, то ее перемещение — это произведение рычага на угол поворота, измеренный в радианах. Но если умножить силу, приложенную к педали, на рычаг педали, получится действующий на педаль момент силы. Поэтому работу, которую вы совершаете над педалью, можно считать произведением приложенного к педали момента силы на угол поворота педали.

Для таких устройств, как велосипед или электродвигатель, где энергия передается при вращательном движении, уравнение 6.4.1 весьма удобно. Но сейчас вам достаточно понимать, что электромотор совершает над вентилятором работу посредством момента силы (крутящего момента) и что вентилятор использует эту работу для перемещения воздуха из области низкого давления в область высокого давления.

Теперь мы можем объяснить, почему пылесос так пронзительно завывает, если перекрыть воздушный поток. Когда воздух не попадает на ту сторону вентилятора, где давление низкое, вентилятор, естественно, не может подать его на сторону с высоким давлением. Поскольку вентилятор не подает воздух, работа не совершается и сопротивление работе мотора отсутствует. Электромотор быстро



Рис. 6.4.3. Лопасти вращающегося вентилятора пылесоса гонят воздух из области низкого давления в область высокого давления, при этом совершая работу над воздухом и повышая его полную энергию.

набирает скорость выше номинальной и начинает визжать. Если вы освободите путь воздуху, вентилятор и электромотор снова начнут совершать над ним работу, обороты двигателя снизятся и пронзительный звук исчезнет.

## Фильтры для пыли

Вентилятор пылесоса создает воздушный поток, который уносит с собой пыль. Но в конце концов пылесос возвращает этот воздух в комнату. Что мешает пыли попасть обратно в комнату вместе с ним?

В большинстве случаев это забота фильтра, который не пропускает пыль, но пропускает молекулы воздуха. Самый обычный фильтр сделан из пористой бумаги или ткани свободного плетения, в которой промежутки между нитями достаточно просторны для молекул воздуха, однако слишком узки для частиц пыли.

Из-за вязкости простая фильтрация затруднена. При прохождении сквозь поры бумаги или ячейки ткани воздух испытывает действие вязкого сопротивления и теряет часть своей полной энергии. Чем уже и длиннее поры, тем сильнее трение воздуха об их стенки и тем больше энергии пропадает зря из-за вязкого сопротивления. В новом фильтре много широких, коротких пор, поэтому воздух теряет относительно немного энергии. Фильтр удаляет пыль из воздуха, но почти не влияет на воздушный поток, поэтому пылесос работает надежно. Однако по мере того как в фильтре накапливается пыль, открытых пор становится меньше, они сужаются, удлиняются, и потери энергии из-за вязкости растут. Пытаясь просочиться сквозь забитый фильтр, воздух теряет большую долю своей энергии, и пылесос уже не так добросовестно чистит ваш ковер.

Конструкторы большинства современных пылесосов все чаще решают проблему постепенной потери «всасывающей способности», отказываясь от пористых фильтров и применяя вместо этого метод сбора пыли за счет большего ускорения. В пылесосах системы *Dyson* воздушный поток закручивается в виде устойчивого вихря. Поскольку движение вихря по кругу происходит с центростремительным (то есть направленным к центру вихря) ускорением, на частицу пыли действует осевая сила, которая превращает прямую траекторию пылинки в спиральную. Воздух легко справляется с таким спиральным движением; он развивает градиент давления спонтанно, с высоким давлением на внешней стороне спирали и низким в середине, как при повороте потока воды в шланге (рис. 6.1.2). Градиент давления толкает воздух внутрь и плавно направляет поток по заданному спиральному пути.

Но частицы пыли слишком тяжелы для того, чтобы последовать за воздушным вихрем. Ни силы, возникающие из-за перепада давления, ни вязкое трение не могут изменить траектории пылинок и закрутить их по спирали. В воздушно-пылевом вихре пылинки постепенно уходят в сторону, их инерция берет верх над слабыми центростремительными силами. В конце концов пыль отделяется от воздушного потока и собирается в коллекторе, откуда ее можно выбросить. Воздушный поток завершает свой путь по спирали и выбрасывается в окружающий воздух.

Пылесосы делятся на два типа — с фильтрацией воздуха перед вентилятором и после него. В пылесосах *Dyson*, как и в классических моделях, воздух фильтруется перед вентилятором (рис. 6.4.4). Главная задача вентилятора в них — повысить давление воздуха на выходе из фильтрующей системы так, чтобы воздух покинул вентилятор почти при атмосферном давлении и ему хватило энергии на выход в комнату.

В вертикальных пылесосах фильтр расположен противоположным образом — после вентилятора. Воздушный поток поднимается от ковра, проходит через вентилятор, огибает двигатель и наконец попадает в фильтр (рис. 6.4.5). Вентилятор должен обеспечить продвижение потока через систему фильтрации обратно в комнату, поэтому давление воздуха на выходе из него намного выше атмосферного.

Пожалуй, ярче всего различие между пылесосами этих двух типов проявляется тогда, когда в них попадает какой-нибудь предмет вроде монетки. Если фильтр стоит перед вентилятором, монетка останется в фильтре и в вентилятор никак не попадет. Если фильтрация происходит после вентилятора, монетка пролетит через вентилятор и попадет в фильтр. Перемещать тяжелую монетку за счет сил

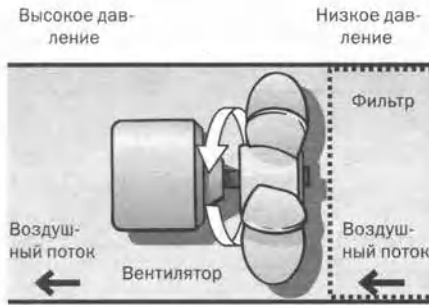


Рис. 6.4.4. В обычном пылесосе с контейнером для пыли воздух из шланга сначала проходит через фильтр, а потом через вентилятор. Вентилятор гонит воздух из области низкого давления, изнутри пылесоса, наружу, в область атмосферного давления.

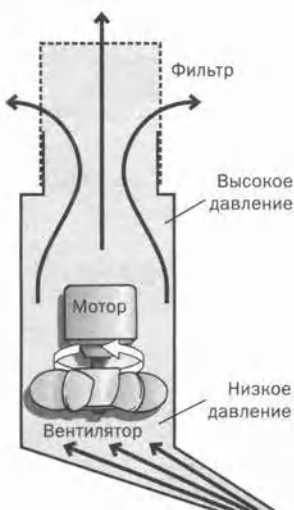


Рис. 6.4.5. В вертикальном пылесосе вентилятор засасывает воздух с поверхности ковра и выдувает его наружу через фильтр.

вязкого сопротивления пылесосу трудно, поэтому она будет вертеться вокруг вентилятора, издавая громкий треск. Обладателям вертикальных пылесосов этот звук, наверное, хорошо знаком.

## Фены и диффузоры

---

Фен для волос напоминает короткий, компактный пылесос с нагревательным элементом, смонтированным рядом с выходным отверстием. Фен создает внутри себя разрежение, и воздух из комнаты затягивается в него через фильтр. Входящий поток превращает обусловленную давлением потенциальную энергию в кинетическую и быстро проходит по фену. Фен совершает над воздухом работу и повышает его полную энергию. Затем воздух обдувает нагревательный элемент, тот передает воздуху тепловую энергию и повышает его температуру. И наконец, нагретый воздух выходит наружу и направляется на ваши волосы.

В момент, когда воздушная струя проходит через сопло фена, она расширяется, и линии потока несколько отдаляются друг от друга. При этом скорость воздуха уменьшается, а давление растет. Из-за этого скачка давления в сопле воздух в действительности покидает фен с давлением чуть меньше атмосферного и по-прежнему способен выйти наружу, в комнату. Быстрый поток теплого воздуха вырывается из фена и сушит ваши волосы.

Если вам не нужна быстрая воздушная струя, установите на стандартное выходное отверстие диффузор. Раструб диффузора позволяет линиям потока расширяться шире, вследствие чего скорость воздуха вдоль отдельной линии резко падает, а давление растет. Давление воздуха, который поступает из фена в диффузор, значительно ниже атмосферного, а сравнивается с атмосферным только у края диффузора, когда львиная доля кинетической энергии уже перешла в потенциальную энергию давления. Из диффузора воздух выходит медленнее и не так сильно треплет волосы, как при сушке феном без диффузора.

## Энергия ветра и воды

---

Вентилятор пылесоса использует энергию, которую подает электромотор, для наращивания полной энергии проходящего через него воздуха. Ветряной генератор и гидротурбина уменьшают полную энергию проходящих через них ветра и воды, чтобы передать совершаемую при вращении работу электрогенератору. Эти устройства — антиподы!

Однако тот факт, что вентиляторы, пропеллеры, турбины и ветряные генераторы очень схожи меж собой, не должен вызывать удивления, ведь все они являют собой крыльчатку. Если им в процессе вращения передать работу, они добавят потоку, который через них проходит, дополнительную энергию и повысят его скорость и/или давление. А если извлечь из их вращения работу, они отнимут энергию у потока, который через них проходит, и понизят его скорость и/или давление. В общем смысле все только что сказанное относится к энергии ветра и воды.

Однако на деле для того, чтобы ветряной генератор и гидротурбина были эффективными, требуется тщательный инженерный расчет. Поскольку они получают энергию потока за счет подъемных сил (в процессе, противоположном работе пропеллера самолета, с. 191–192, когда подъемные силы используются для увеличения энергии проходящего потока), силы сопротивления надо бы убрать. Если вызванное вязкостью или давлением сопротивление велико, очень много энергии уйдет на нагрев потока.

Силы вязкого сопротивления можно ограничить, уменьшив площадь поверхности лопастей, а обусловленное давлением сопротивление — обеспечив ламинарное течение или хотя бы минимизировав турбулентность в системе. Кроме того, ветряной генератор и турбина должны активно взаимодействовать с потоком воздуха или воды и использовать для добычи энергии как можно больше воздуха, так что лопасти приходится очень точно ориентировать по отношению к набегающему потоку. Поэтому главное направление усовершенствования гидроэнергетических систем и ветродвигателей — это разработка все более эффективных и экономичных лопастей.

---



## ГЛАВА 7

# ТЕПЛО И ТЕПЛОПЕРЕДАЧА

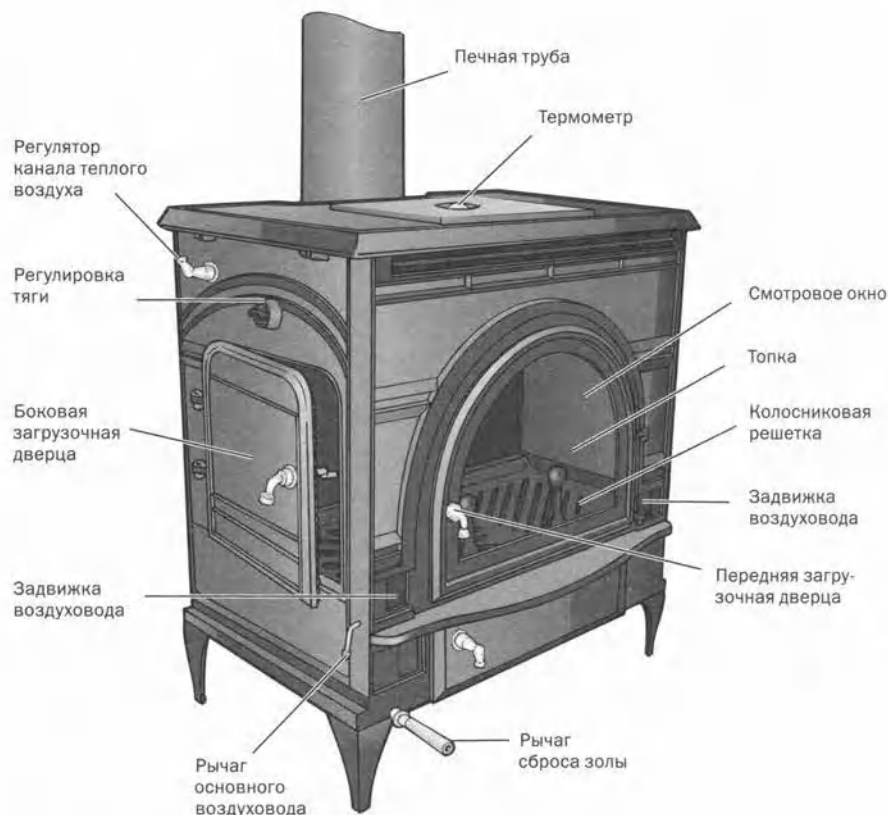
---

**М**ы не можем наблюдать всего того движения, которое нас окружает. Какие-то его виды скрыты от нас бесконечно глубоко — например, движение атомов и молекул, которые благодаря тепловой энергии безостановочно колеблются взад и вперед. Обычно мы вспоминаем о тепловой энергии только потому, что она определяет температуру предметов; чем больше тепловой энергии содержит предмет, тем выше его температура и тем горячее он на ощупь.

Тем не менее тепловая энергия играет важную роль в повседневной жизни. Тепловая энергия может не только перемещаться из одного места в другое, но и превращать вещество из твердого тела в жидкость и в газ. Касаясь горячего предмета, вы ощущаете, как его тепловая энергия перетекает в вашу относительно холодную руку и повышает температуру кожи. Когда тепловая энергия передается подобным образом, от более горячего тела к более холодному, мы называем ее просто теплом.

Тепло и огонь оставались величайшими тайнами природы вплоть до последних нескольких столетий. И несмотря на то что сегодня имеется научное понимание их сущности, тепло и огонь по-прежнему сохраняют некую древнюю таинственность. Мы все еще собираемся вокруг костра и вглядываемся в него, словно пытаемся разглядеть в языках пламени какую-то изначальную частицу природы. И разве можно оставаться равнодушным, когда яркие вспышки фейерверка пронзают небо? Подобно Прометею, мы тянемся к огню и не всегда можем сопротивляться его притягательности. Откуда иначе могло взяться выражение “играть с огнем”? Моим родителям повезло, что они не знали, как часто я обжигал пальцы или подпаливал одежду во время рискованных “научных” экспериментов; если вы похожи на меня, то, наверное, и с вами в детстве случалось подобное. В этой главе мы будем говорить не только об огне, но и о температуре, тепле и агрегатных состояниях вещества, чтобы в конечном счете больше узнать о нашем мире, который так холоден и так горяч.

- 216 **7.1 Печи**  
*Как печи производят тепло и обогревают ваш дом.*
- 230 **7.2 Вода, пар и лед**  
*Как вода переходит из твердого состояния в жидкое, а затем в газообразное.*
- 237 **7.3 Лампы накаливания**  
*Как раскаленная нить в лампе производит свет.*
- 245 **7.4 Одежда и теплоизоляция**  
*Почему вы не замерзаете даже в морозный день.*
- 255 **7.5 Термометры и термостаты**  
*Как термометр измеряет температуру, а термостат ее поддерживает.*



## 7.1. Печи

Если бы не отопление, каким неприятным временем была бы для большинства людей зима! Но благодаря печам и котлам у нас в домах тепло, даже когда снаружи мороз. Один из наиболее популярных способов отопления — дровяная печь: горящее в ее топке полено посылает в комнату тепловую энергию. В этом разделе мы рассмотрим, как в печи образуется тепловая энергия и каким образом она выходит наружу, чтобы согреть нас.

### Горящее полено: тепловая энергия



**Рис. 7.1.1.** Эта дровяная печь распространяет тепло по комнате за счет теплопроводности металлических стенок, конвекции воздуха вокруг печи и излучения от черной поверхности.

Дровяная печь производит тепловую энергию и распространяет ее по комнате в виде тепла (**рис. 7.1.1**). Мы уже несколько раз сталкивались с тепловой энергией — когда толкали по пандусу шкафчик с нотами, когда удивлялись, почему наш старый мячик стал так плохо отскакивать от пола, когда наблюдали, как медленно мед вытекает из банки. Во всех этих случаях упорядоченная энергия — энергия, которую легко можно преобразовать в работу, — превращалась в неупорядоченную тепловую энергию, а температура соответствующих объектов возрастала. Но теперь, когда нам предстоит изучить устройства для получения тепла, давайте пересмотрим представления о тепловой энергии и температуре, чтобы понять, как тепловая энергия передается от одного тела к другому.

Когда полено горит в камине или в печке, упорядоченная химическая потенциальная энергия превращается в тепловую. Тепловая энергия — это неупорядоченная форма энергии, которая складывается из кинетической и потенциальной энергий отдельных атомов и молекул. Наличие тепловой энергии в полене, печи и воздухе обуславливает их температуру; чем большей тепловой энергией обладает полено, печь и воздух, тем выше их температура.

Природа тепловой энергии отчасти зависит от того, в чем она содержится. В пылающем полене тепловой энергией обладают главным образом атомы и молекулы, которые быстро колеблются взад-вперед относительно друг друга. Ка-



жда из этих частиц в движении обладает кинетической энергией, а когда она сталкивается с соседними — потенциальной.

В окружающем полене воздухе тепловая энергия также в основном сосредоточена в атомах и молекулах. Но поскольку в воздухе частицы распределены гораздо дальше и гораздо более независимы друг от друга, основную часть тепловой энергии составляет кинетическая. Частицы имеют потенциальную энергию только в те относительно редкие моменты, когда они сталкиваются.

В металлической кочерге, которой вы орудуете в очаге, тепловой энергией обладают не только атомы и молекулы, но и подвижные электроны, которые перемещаются по металлу и тем самым обуславливают его способность проводить электричество.

Важно знать, какая энергия является тепловой, но не менее важно знать, какая не является. Тепловая энергия поленя включает только его внутреннюю неупорядоченную энергию, но не энергию, относящуюся к полену в целом. Шевеля поленю кочергой, вы увеличиваете его кинетическую энергию, поднимая его каминными щипцами — гравитационную потенциальную энергию. Пытаясь переломить обуглившееся поленю с помощью другого поленя, вы увеличиваете потенциальную энергию упругой деформации поленя. Во всех этих случаях возрастает энергия поленя в целом, однако не его тепловая энергия.

## Межатомные силы: химическая связь

Чтобы понять, каким образом горящее бревно производит тепловую энергию, рассмотрим связи между атомами и химическую потенциальную энергию этих связей. Поскольку и то и другое является результатом действия межатомных сил, с них мы и начнем.

При сближении двух атомов между ними начинают действовать силы притяжения (рис. 7.1.2, а). Эти химические силы имеют электромагнитную природу, и они действуют тем сильнее, чем ближе находятся атомы. Однако притяжение уменьшается, как только атомы подходят вплотную друг к другу, и в какой-то момент сменяется отталкиванием (рис. 7.1.2, б). Расстояние между атомами, на котором притяжение исчезает и начинается отталкивание, называется равновесным — на этом расстоянии атомы не воздействуют друг на друга никакими силами (рис. 7.1.2, в). Поскольку атомы чрезвычайно малы, эти равновесные расстояния тоже крайне малы и обычно составляют примерно одну десятиллиардную часть метра.

Представьте себе, будто вы захватили двумя пинцетами два атома и медленно сближаете пинцеты. Поначалу атомы сами притягиваются друг к другу, совершая работу над вами и увеличивая вашу энергию. Так как суммарная энергия сохраняется, энергия атомов при этом должна уменьшаться. Они отдают химическую потенциальную энергию, которая содержится в химических силах, действующих между атомами.

Когда атомы сблизятся до равновесного расстояния, вы можете отпустить их, но они уже не разъединятся. Подобно двум соединенным пружиной мячам, атомы находятся в состоянии устойчивого равновесия. Поскольку они лишились части своей химической потенциальной энергии, они не могут разъединиться, пока эта энергия не будет им возвращена. Требуется приложить работу, чтобы разделить их, таким образом, атомы удерживаются рядом с помощью химической связи.

Связанные атомы образуют молекулу. Прочность их связи определяется величиной работы, которую атомы совершили при сближении, или, что то же самое, работой, необходимой для того, чтобы их разъединить. Характер связи может изменяться от очень сильной (в случае двух атомов азота) до чрезвычайно слабой (в случае двух атомов неона). Более подробно я расскажу про различные типы химических связей позже, в частности в главе 18, когда мы займемся химической физикой.

Если связанные атомы обладают некоторым избытком энергии, то они могут колебаться взад-вперед относительно равновесного расстояния между ними (рис. 7.1.2, г). Когда атомы быстро движутся по направлению друг к другу или прочь друг от друга, то большая часть их энергии — кинетическая. Когда атомы движутся медленно в точках остановки — это в основном химическая потенциальная энергия. В целом же полная энергия молекулы остается неизменной, и молекула совершает колебания, пока каким-то образом не передаст свою избыточную энергию.

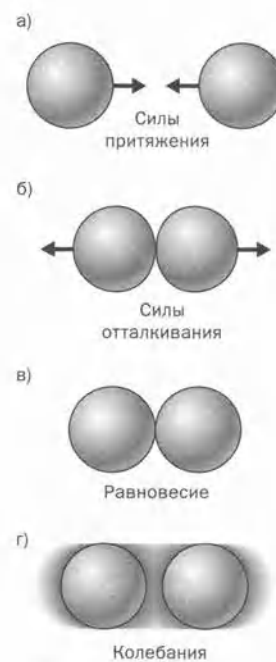


Рис. 7.1.2. (а) Два атома притягиваются друг к другу на средних расстояниях, но (б) отталкиваются, когда подходят слишком близко. (в) На равновесном расстоянии они не притягиваются и не отталкиваются, то есть находятся в равновесии. (г) Пары атомов, обладающие избыточной энергией, колеблются взад и вперед относительно равновесного расстояния.

❶ До Бенджамина Томпсона, графа Румфорда (английский физик и государственный деятель американского происхождения, 1753–1814) считалось, что тепло — это некий флюид под названием теплорода, который содержится в телах. Томпсон опроверг теорию теплорода, наблюдая за трением: выяснилось, что процесс высверливания жерла в металлической заготовке для пушки может служить бесконечным источником тепла. Помимо вклада в науку и технику, Томпсон усовершенствовал технологии приготовления пищи и отопления. Он придумал новую конструкцию камина с заслонками, которые позволяли уменьшить количество дыма, проникающего в комнату, и улучшить обогрев помещений. Жизнь Томпсона была полна авантур, невероятных взлетов, падений и поворотов судьбы. В 1775 г. он бежал из Нью-Гэмпшира, поскольку был лоялистом — сторонником британской монархии. В 1782 г. ему пришлось бежать уже из Лондона, потому что в нем подозревали французского шпиона. Позднее, как раз в те годы, когда он занимался изучением тепла, Томпсон стал одним из наиболее могущественных людей в Баварии.

❷ Различные вещества, входящие в состав спичечной головки, обладают избыточным химическим потенциалом, но не могут произвольно высвободить эту энергию. Чиркая спичкой, вы используете трение для извлечения энергии активации, необходимой, чтобы началась химическая реакция. При этом соединения в головке спички и на поверхности коробка преобразуются и выделяют достаточно химической потенциальной энергии для того, чтобы сильно разогреться. Сначала вспыхивает головка спички, затем — сама спичка. Первым загорается фосфор. Из-за трения он нагревается и из стабильного красного фосфора превращается в активный белый фосфор. Белый фосфор легко реагирует с веществами, содержащими кислород, включая кислород воздуха, — и спичка воспламеняется. В обычных (терочных, или “безопасных”) спичках красный фосфор содержится лишь в шероховатой полоске на коробке, поэтому спичка загорается, только если чиркнуть ею по коробку. В “бестерочных” спичках красный фосфор содержится в головке, поэтому такие спички воспламеняются при трении о любую шероховатую поверхность.

Однако многие молекулы содержат более двух атомов. В больших молекулах каждая пара соседних атомов образует химическую связь и характеризуется равновесным расстоянием. Если вы предоставите этой молекуле избыток энергии, она будет колебаться сложным образом, по мере того как энергия будет передаваться от атома к атому и от связи к связи. Атомы в молекуле будут продолжать колебаться, пока каким-то способом молекула не избавится от лишней энергии.

Как и все жидкие и твердые вещества, наше горящее полено — не более чем огромное скопление атомов и молекул, которые удерживаются вместе благодаря химическим связям различной силы. Колеблясь относительно равновесного расстояния, частицы то и дело толкают друг друга. Это тепловое движение — соответственно, и энергия, связанная с этим хаотическим движением, является тепловой. Поскольку тепловая энергия распределена между атомами и непредсказуемым образом переходит от одного к другому, ее нельзя непосредственно использовать для совершения работы.

## Тепло и температура

Все вокруг — от пылающего полена до холодной металлической кочерги, которой вы ворошите угли, — содержит тепловую энергию. Однако это не означает, что тепловая энергия распределена равномерно. Что, собственно, происходит, когда вы ворочаете полено кочергой?

При соприкосновении полено и кочерга начинают обмениваться тепловой энергией. В каком-то смысле эти два тела становятся одним, и тепловая энергия, которая перемещалась между атомами каждого из них, начинает перетекать через точку их соединения. Так как и полено, и кочерга до этого обладали определенным запасом тепловой энергии, энергия перетекает через точку контакта в обоих направлениях. Однако суммарный поток, возможно, будет двигаться от одного предмета к другому. Чтобы предсказать направление этого потока, нужно определить температуру каждого из тел.

Температура — это величина, которая определяет, в каком направлении тепловая энергия будет (если будет) естественным образом перетекать между двумя телами. Если при соприкосновении не происходит перетекания тепловой энергии, значит, два тела находятся в состоянии теплового равновесия и их температуры равны. Но если энергия перетекает от первого тела ко второму, значит, первое тело горячее, чем второе.

Температурная шкала распределяет тела в соответствии с тем, в каком направлении в каждой паре будет передаваться тепловая энергия. Тело с более высокой температурой всегда будет передавать энергию телу с более низкой температурой. Два тела с одинаковой температурой будут оставаться в состоянии теплового равновесия. Таким образом, горячее полено будет передавать тепловую энергию холодной кочерге. Мы говорим, что пылающее полено горячее, потому что в большинстве случаев оно передает тепловую энергию другим предметам. А кочерга — холодная, так как в большинстве случаев другие предметы, как правило, передают ей свою тепловую энергию.

Энергия, которая передается от одного тела к другому благодаря разнице их температур, называется теплом. Тепло — это передаваемая тепловая энергия. Строго говоря, горячее полено не обладает теплом; оно обладает тепловой энергией. Тем не менее, когда полено передает энергию кочерге из-за разницы температур, именно тепло перетекает от полена к кочерге (об истории изучения тепла см. ❶).

Определение температуры, которое мы дали, помогает расположить окружающие тела от горячих к холодным, однако оно никоим образом не выражает температуру количественно. Вы можете составить свою собственную температурную шкалу, попарно сравнив множество тел и определив, в каком направлении будет идти тепловой поток в каждой паре, но вряд ли эта бессмысленная работа доставит вам удовольствие. Гораздо лучше использовать одну из имеющихся стандартных температурных шкал — Цельсия, Фаренгейта или Кельвина.

В основу этих шкал положена средняя тепловая кинетическая энергия, приходящаяся на один атом. Чем большей кинетической энергией в среднем обладает каждый атом одного тела, тем интенсивнее тепловое движение и тем больше тепловой энергии он передает атомам другого тела в форме микроскопических

порций работы. Эти мельчайшие дозы работы и есть то, что в действительности передает тепло между телами, — маленький толчок здесь, крошечный рывок там, и все это на уровне атомов. Так как тело, обладающее большей удельной тепловой кинетической энергией, будет отдавать тепло телу с меньшей энергией, имеет смысл привязать температуру к среднему количеству тепловой кинетической энергии, приходящейся на один атом.

На этом и основаны все три известные температурные шкалы — Цельсия, Фаренгейта и Кельвина. В каждой из них один градус повышения температуры отражает определенное приращение средней кинетической энергии. В качестве точек отсчета соотношения энергии и температуры принимаются три стандартных состояния: абсолютный нуль и температуры замерзания и кипения воды\* (как мы помним из раздела 5.1, абсолютный нуль — это температура, при которой тело не обладает тепловой энергией). Как только какие-то значения температуры связываются с двумя стандартными состояниями — температурная шкала готова. Например, шкала Цельсия построена на том, что за 0 принята температура замерзания, а за 100 — температура кипения воды. Значения температур для всех трех стандартных состояний приведены в таблице 7.1.1.

Таблица 7.1.1. Температуры стандартных состояний по шкалам Цельсия, Кельвина и Фаренгейта

Стандартное состояние	Градусы Цельсия (°C)	Градусы Кельвина (K)	Градусы Фаренгейта (°F)
Абсолютный нуль	-273,15	0	-459,67
Замерзание воды	0	273,15	32
Кипение воды	100	373,15	212

## Открытый очаг и дровяная печь

Предположим, вы ищете какой-нибудь простой способ обогреть помещение. Самый древний и простой метод — развести костер прямо на полу вашей хижины (рис. 7.1.3). Горящее дерево производит тепловую энергию, которая в виде тепла распространяется по холодному помещению. Но каким же образом при сгорании дров образуется тепловая энергия?

Эта тепловая энергия выделяется в ходе химической реакции между молекулами дерева и кислорода воздуха. Мы помним, что, вступая в химическую связь, атомы производят работу, и количество этой работы зависит от того, какие именно атомы соединяются. Например, хотя атомы углерода и водорода могут соединиться друг с другом с образованием углеводородной молекулы, однако каждый из этих элементов образует гораздо более крепкую связь с кислородом. И пусть для "демонтажа" углеводородной молекулы требуется совершить некоторую работу, эта работа будет гораздо меньшей той, что совершат атомы углерода и водорода, соединяясь с кислородом. Когда углеводородная молекула сгорает в кислороде, возникают новые, более крепкие связи. При этом потенциальная химическая энергия выделяется в виде тепловой. Продукты реакции, происходящей при сгорании углеводородов в воздухе, — главным образом вода и углекислый газ.

Дерево состоит в основном из целлюлозы — длинных молекул углеводов. В состав углеводов входят атомы углерода, водорода и кислорода. Несмотря на присутствие некоторого количества кислорода, углеводы достаточно хорошо горят с образованием воды и углекислого газа.

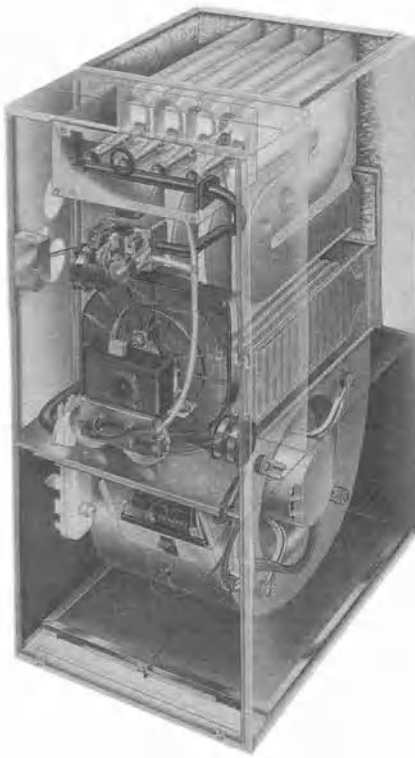
Когда вы поджигаете дерево спичкой, вы сообщаете ему энергию, необходимую для разрыва старых химических связей, в результате которого могли бы образоваться новые. Эта начальная энергия, необходимая для запуска химической реакции, называется энергией активации. Пламя спички дает дереву достаточно тепловой энергии, чтобы разорвать химические связи между разными атомами и начать реакцию (подробнее о спичках см. 2).

К сожалению, дерево состоит не только из чистой целлюлозы: оно также содержит сложные смолы, которые плохо горят и образуют дым. Если вы собираетесь дышать тем же воздухом, в котором сжигаете топливо, то дрова — это очень плохой

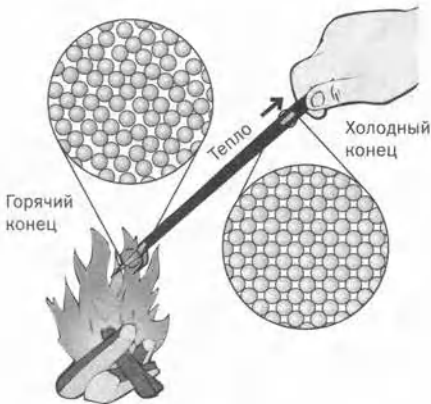
\* Речь идет о замерзании и кипении воды при стандартном атмосферном давлении. Для того чтобы исключить из определения шкалы Кельвина атмосферное давление, эту шкалу в последнее столетие определяют через температуру тройной точки воды, то есть температуру, при которой вода может существовать в виде льда, жидкости и пара одновременно.



Рис. 7.1.3. Открытое пламя дает возможность целлюлозе и другим веществам в составе дерева вступать в реакцию с кислородом и высвобождать таким образом химическую потенциальную энергию в виде тепловой. Огонь зажигают с помощью спички, чтобы обеспечить начальную энергию активации для этой реакции, но затем огонь поддерживает себя сам.



**Рис. 7.1.4.** В этом современном обогревателе природный газ горит в S-образной камере сгорания. Вентилятор в нижней части обогревателя прогоняет свежий воздух вдоль горячей наружной поверхности камеры и затем распространяет нагретый воздух по комнатам.



**Рис. 7.1.5.** Если нагреть один конец металлического стержня, то атомы в этой части стержня будут колебаться более интенсивно, чем в холодном конце, и металл начнет проводить тепло из горячего конца к холодному. Некоторая часть этого тепла передается благодаря взаимодействию соседних атомов, однако основная его часть будет передана подвижными электронами, которые переносят тепловую энергию на большие расстояния от одного атома к другому.

выбор. Гораздо лучше — керосин или природный газ: они представляют собой практически чистые углеводороды, поэтому и горят чисто. Правда, дерево можно превратить в более чистое топливо, если предварительно обжечь его в печи без доступа воздуха, чтобы отогнать все летучие смолы. При этом дерево превращается в древесный уголь, при сгорании которого образуются почти чистый углекислый газ, вода и зола.

Но даже при использовании чистого топлива открытый огонь в помещении имеет недостатки: он пожирает кислород и угрожает безопасности. Тем не менее на протяжении тысяч лет жилища обогревали открытыми очагами. Печи, в которых горят дрова или торф, оборудованы дымовыми трубами, через которые выходят вредные дымовые газы, но вместе с ними уносится значительная часть тепла и часть комнатного воздуха. Вот почему в помещениях, которые обогреваются каминами, так часто бывают сквозняки — причиной тому сами каминные, так как холодный наружный воздух просачивается в дом сквозь щели и трещины, чтобы заменить теплый воздух, буквально улетающий в трубу. Даже при использовании чистых видов топлива и отсутствии дымохода проблемы кислорода и безопасности не имеют простых решений.

Как и в камине, так и в дровяной печи дым от горящих дров выводится через дымовую трубу. Но прежде чем вместе с дымом улетучится тепловая энергия, правильно сконструированная дровяная печь передаст большую часть этой энергии в комнату. Дровяная печь — пример теплообменника, то есть устройства, которое передает тепло, не передавая при этом горячих молекул. В комнату не поступает дым из печи, однако поступает тепло этого дыма. Газовый котел, представленный на **рис. 7.1.4**, также использует принцип теплообмена.

Горящие угли и раскаленные газы в печи обладают большим количеством тепловой энергии. Они намного горячее, чем воздух в комнате. Благодаря этой разнице температур тепло стремится перейти от огня в комнату. Но по сей день еще не вполне понятно, как же именно происходит передача тепла.

Существует три принципиальных механизма, с помощью которых тепло передается от огня в комнату: теплопроводность, конвекция и излучение. В дровяной печи замечательным образом сочетаются все три этих способа, благодаря чему большая часть тепловой энергии, выделяемой при сгорании древесины, передается в комнату. Давайте рассмотрим подробнее три механизма переноса тепла, начиная с теплопроводности.

## Как тепло передается через металл: теплопроводность

Теплопроводностью называют прохождение тепла через неподвижный материал. При этом из горячей области в холодную движется тепло, но не сами атомы и молекулы. Например, если вы засунете один конец кочерги в огонь, то постепенно, по мере того как металл будет проводить тепло, нагреется и ручка.

Небольшая часть этого тепла передается благодаря взаимодействию между соседними атомами. Атомы колеблются и часто сталкиваются друг с другом, совершая при этом микроскопическую работу и обмениваясь крошечными порциями тепловой кинетической энергии. Таким образом тепловая энергия случайным образом передается от одного атома к другому. Но когда один конец кочерги горячее, чем другой, этот поток перестает быть случайным. У атомов на горячем конце больше тепловой кинетической энергии для обмена с соседями, чем у атомов на холодном конце. Обмены статистически благоприятствуют перетеканию тепловой энергии от горячего конца к холодному.

Такой поток тепловой энергии через кочергу от тепла к холоду обусловлен теплопроводностью (**рис. 7.1.5**). Однако описанный механизм передачи тепла “по цепочке” от одного атома к другому не является единственным. В металлах основными носителями тепла в действительности являются подвижные электроны — мельчайшие отрицательно заряженные частицы, составляющие внешнюю часть оболочки атомов. Когда атомы объединяются, чтобы сформировать металл, некоторые электроны перестают принадлежать определенным атомам и почти свободно путешествуют по металлу. Эти подвижные электроны способны проводить электрический ток (мы поговорим об этом в главе 10), а также хорошо умеют передавать тепло.

Подвижные электроны участвуют в переносе тепла по цепочке, так как они тоже могут сталкиваться с колеблющимися атомами и обмениваться с ними тепловой энергией. Но в то время как атомы могут передавать тепло только своим

непосредственным соседям, подвижные электроны способны преодолевать большие расстояния между двумя точками обмена и таким образом могут быстро переносить тепловую энергию из одного места в другое.

Легкость, с которой электроны переносят тепло по металлу, объясняет, почему теплопроводность металлов обычно выше, чем у неметаллов. Теплопроводность — это мера того, насколько быстро тепло проходит через материал при наличии разницы температур. Лучшие проводники электричества — серебро, медь, золото и алюминий — являются в то же время лучшими проводниками тепла. Относительно слабые проводники электричества (например, нержавеющая сталь) и изоляторы, такие как пластмассы и стекло, плохо проводят и тепло. Есть несколько исключений из этого правила. Алмаз, например, очень плохой проводник электричества, но прекрасно проводит тепло. Конечно, было бы глупо попытаться построить печь из алмазов; в конце концов, алмазы прекрасно горят\*.

Именно благодаря теплопроводности тепло проходит из внутренней части печи к наружным стенкам. Никакие атомы не проходят через металлические стенки, только тепло. Таким образом, теплопроводность является фильтром, позволяющим отделить нужную нам тепловую энергию от нежелательных дыма и вредных газов, которые уходят в трубу.

Итак, благодаря теплопроводности наружная поверхность печи становится горячей, позволяя теплу распространяться по холодной комнате. Но что именно переносит тепло в комнату? Если вы дотронетесь до печи, большое количество тепла с помощью теплопроводности тут же передастся вашей коже и вы обожжетесь. Даже не дотрагиваясь до печи, вы чувствуете ее жар. Дело в том, что печь передает тепло в комнату с помощью конвекции и излучения.

## Как тепло передается с воздухом: конвекция

Когда движущийся поток переносит тепло от горячего тела к более холодному — это и есть конвекция. Тепло переносится в виде тепловой энергии потока, то есть они перемещаются вместе. Поток обычно циркулирует между двумя телами, забирает тепло у более горячего, отдает его более холодному и затем возвращается к горячему, чтобы начать сначала.

Такая циркуляция часто происходит естественным образом. Когда поток нагревается от горячего тела, его плотность уменьшается и он поднимается вверх под действием силы выталкивания (силы Архимеда). Затем он охлаждается возле холодного тела, его плотность увеличивается, и он опускается вниз.

Итак, воздух нагревается при контакте с поверхностью печи, поднимается к потолку, при этом замещается более холодным воздухом от пола (рис. 7.1.6). Рано или поздно этот нагретый воздух охлаждается и опускается. Когда он достигает пола, его вновь притягивает к горячей печи, и цикл повторяется. Движущийся воздух называется конвекционным потоком, а его повторяющийся путь — конвективной ячейкой. Внутри помещения конвекционные потоки переносят тепло от печи к потолку и стенам. Поднеся ладонь к печи, вы можете ощутить этот поток, нагревающий вашу руку.

Естественной конвекции достаточно, чтобы нагреть воздух над печью, но при этом основная масса теплого воздуха собирается под потолком. И хотя некоторая часть его в конце концов опустится к вам, конвекции часто нужно помочь. Вентилятор, установленный под потолком, ускорит движение горячего воздуха по комнате и тем самым сделает печь более эффективной. Подобная принудительная конвекция точно так же передает тепло от печи к более холодным объектам в комнате, но теперь циркуляция воздуха уже не зависит от одной только силы выталкивания. Чем быстрее движется воздух, тем больше тепла он может перенести от горячих тел к холодным.

## Как тепло передается со светом: излучение

Существует еще один важный механизм переноса тепла — излучение. Частицы вещества, обладающие тепловой энергией, колеблются и при этом испускают и поглощают электромагнитное излучение. Это излучение представляет собой электромагнитные волны и включает в себя радиоволны, микроволны, а также инфракрасный, видимый и ультрафиолетовый свет.

\* Среди этих исключений нет металлов. Для металлов хорошо выполняется закон Видемана — Франца, утверждающий, что отношение коэффициентов тепло- и электропроводности вещества пропорционально его абсолютной температуре. Для неметаллов этот закон не работает, поэтому только среди них и встречаются указанные исключения.



Рис. 7.1.6. Конвекция переносит тепло от горячей поверхности печи к потолку и стенам помещения. Теплый воздух поднимается вверх, поддерживаемый силой выталкивания, и заменяется более холодным воздухом, поднимающимся от пола. Нагретый воздух охлаждается и в конце концов снова опускается. Затем он возвращается к печи, чтобы повторить цикл.

Мы подробно обсудим электромагнитное излучение в главе 13, а пока что нам важно отметить, что это излучение способно переносить тепловую энергию. Когда тепло передается от теплого тела к холодному с помощью электромагнитных волн, мы называем это тепловым излучением или просто излучением. В отличие от теплопроводности и конвекции, где тепло переносят атомы, молекулы или электроны, электромагнитные волны непосредственно проходят через пространство. Передача тепла излучением происходит, даже когда между двумя телами пустота.

Тип электромагнитного излучения зависит от температуры. Холодные тела излучают только радио- и микроволны и инфракрасный свет. Более горячие тела способны испускать видимый и даже ультрафиолетовый свет. Красное сияние угля, пылающего в топке, — это его тепловое излучение.

Поскольку наши глаза воспринимают только видимый свет, мы не можем увидеть весь спектр теплового излучения тела, даже если оно горячее. Но независимо от того, видим мы его или нет, электромагнитное излучение обладает энергией и передает тепло всем объектам, способным его поглощать. Все предметы вокруг нас испускают тепловое излучение, но его количество зависит от температуры: чем горячее тело, тем больше тепловой энергии оно испускает. Если поместить рядом два тела, тепловое излучение между ними пойдет в обоих направлениях. Однако более горячее тело будет доминировать в этом процессе, и в результате произойдет передача тепловой энергии более холодному. При излучении тепло всегда переходит от теплого тела к холодному\*.

Значительная часть тепла от поверхности печи к окружающим предметам передается излучением. Печь буквально заливает комнату инфракрасными лучами, которые согревают все уголки, в которые способны проникнуть. Чтобы усилить передачу тепла посредством излучения, печи и трубы часто красят в черный цвет. Черная поверхность не только хорошо поглощает свет, но и особенно сильно испускает тепловое излучение (рис. 7.1.7). Если вы докрасна раскалите черную когергу, она будет сиять гораздо ярче, чем белая, серебряная или прозрачная.

Направив яркий свет на белые, серебристые или прозрачные поверхности, вы можете убедиться, что они гораздо хуже поглощают излучение; большая его часть отразится от поверхности или пройдет насквозь. Если вы посмотрите на такую поверхность, когда она нагрета, то увидите, что она слабо испускает тепловое излучение.

#### **Распространенные заблуждения: черные тела и свет**

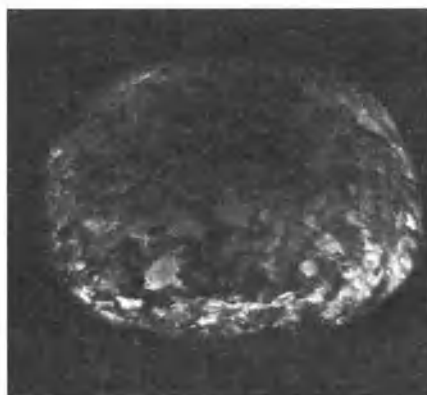
**Заблуждение:** Черное тело никогда не испускает света.

**На самом деле:** Несмотря на то что черное тело поглощает весь падающий на него свет, оно все равно излучает тепло и может ярко светиться, если будет достаточно горячим.

Даже если воздух в комнате прохладный, вы обычно можете ощущать на своем лице невидимые инфракрасные лучи, исходящие от печки. Закрыв лицо руками, вы сразу почувствуете, что лицу стало холоднее, потому что меньше тепла попадает на кожу. Этот эффект теплового излучения еще заметнее, когда речь идет о камине или костре, где тепловое излучение от раскаленных углей и пламени является основным механизмом передачи тепла.

\* Практически никогда в обмене излучением не участвуют всего два тела. Каждое тело в окружающем пространстве испускает тепловое излучение во все стороны, нагревая все остальные тела в этом пространстве. Ситуация, которую описывает автор, может возникнуть лишь в лаборатории, где созданы специальные условия, препятствующие передаче тепла другим телам (например, рассматриваемые тела окружены зеркальной оболочкой, полностью отражающей тепловое излучение других тел).

**Рис. 7.1.7.** Раскаленный брикет угля ярко светится в темноте (слева). Однако на фото, сделанном со вспышкой, видно, что его поверхность на самом деле серая и потому частично поглощает свет (справа). Если бы не светлая зола, черный уголь был бы почти идеальным источником излучения и поглотителем света (то есть абсолютно черным телом).



В целом современная дровяная печь представляет собой отличный теплообменник. По мере того как горячий дым благодаря конвекции поднимается по длинной черной дымовой трубе, он нагревает и печь, и трубу. Эти металлические элементы благодаря теплопроводности передают тепло к своей поверхности, откуда оно распространяется по помещению с помощью конвекции и излучения. Несмотря на то, что печь потребляет воздух, воздушный поток контролируется системой заслонок таким образом, что внутрь попадает только ограниченное количество воздуха, достаточное для полного сгорания дров. Итак, печь эффективно, чисто и безопасно извлекает тепло из горящих дров.

## Обогрев помещения

Вы разжигаете огонь в печи, и тепло от нее начинает поступать в холодную комнату. Тепло, всегда переходящее от более горячего тела к более холодному, проникает в каждый предмет в комнате и постепенно повышает его температуру. Например, если возле печи стоит латунная ваза, которая до этого была холодной, то очень скоро, дотронувшись до нее, вы ощутите приятное тепло.

Рассмотрим зависимость между количеством тепла, полученного вазой, и ее температурой. Поскольку температура вазы возрастает постепенно по мере того, как в нее так же постепенно проникает тепло, общее повышение температуры должно быть пропорционально количеству добавленного тепла. Коэффициент пропорциональности называется теплоемкостью вазы. Теплоемкость — это количество тепла, которое должно быть добавлено к вазе, чтобы повысить ее температуру на один градус. В сущности, теплоемкость вазы является мерой ее сопротивляемости изменению температуры.

Но предположим теперь, что возле печи стоит несколько vaz, изготовленных из разных материалов. Если вы будете следить за изменением их температуры, то обнаружите, что одни вазы нагреваются быстрее, чем другие. Даже если вы примете во внимание разницу в их массе и в количестве полученного тепла, то все равно убедитесь, что вазы, сделанные из разных материалов, по-разному реагируют на добавление тепла. Одни материалы термически более инертны, чем другие.

Имеет смысл характеризовать материалы по теплоемкости на единицу массы — величине, которая называется удельной теплоемкостью. В системе СИ удельная теплоемкость измеряется в джоулях на килограмм-кельвин, сокращенно Дж/(кг·К). Теплоемкость каждой вазы равна произведению ее массы на удельную теплоемкость вещества, из которого она изготовлена.

В таблице 7.1.2 приведены значения удельной теплоемкости некоторых распространенных веществ. Широкий диапазон значений говорит о том, что разные материалы по-разному реагируют на воздействие тепла. Удельная теплоемкость каждого вещества зависит главным образом от количества микроскопических

**Таблица 7.1.2.** Удельная теплоемкость некоторых материалов при комнатной температуре (293 К) и атмосферном давлении

Вещество	Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)
Свинец	128
Латунь	380
Медь	386
Воздух (при постоянном объеме)	715
Стекло	840
Алюминий	900
Воздух (при постоянном давлении)	1001
Дерево	~ 1100
Оргстекло или акриловый пластик	1349
Пар (при постоянном давлении)	2027
Лед	2220
Вода	4190

возможностей запастись тепловой энергией, то есть от количества степеней свободы. Степенью свободы называют независимый способ управления энергией. На каждую степень свободы приходится в среднем количество энергии, равное половине произведения постоянной Больцмана, умноженной на абсолютную температуру. Постоянная Больцмана, с которой мы уже встречались в разделе 5.1, равна  $1,381 \times 10^{-23}$  Дж/К.

Относительно невысокая удельная теплоемкость латуни объясняет, почему ваза так быстро нагревается, когда вы ставите ее рядом с печкой; у нее относительно мало степеней свободы, чтобы запастись тепловой энергией. Но если вы нальете в вазу хотя бы немного воды, то чрезвычайно высокая теплоемкость воды существенно замедлит скорость нагревания вазы. Вода обладает колоссальной способностью хранить тепло.

Подобно латуни и воде, воздух тоже обладает теплоемкостью. Но удельная теплоемкость воздуха зависит от того, как вы ее измеряете. Обычно газы при нагревании расширяются. Если вы запечатаете воздух в бутылке, чтобы его объем не изменялся, он будет нагреваться довольно легко; удельная теплоемкость воздуха при постоянном объеме равна 715 Дж/(кг·К). Но если вы позволите воздуху расширяться по мере увеличения температуры, так что его давление не будет меняться, нагреть его будет гораздо труднее — ему понадобится дополнительная энергия, чтобы по мере расширения вытеснить со своего пути окружающий холодный воздух. Удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении составляет 1001 Дж/(кг·К).

## Современные отопительные приборы

К сожалению, дровяная печь со своей дымовой трубой раскаляется так, что может вас сильно обжечь. Поэтому был сделан следующий шаг: появились топки и дымоходы, отделенные от отапливаемого помещения. Топливо сгорает где-то в изолированной топке, а тепло от сгоревшего газа по какому-либо теплообменнику передается воздуху или воде. Затем горячий воздух или вода циркулируют по зданию, обогревая помещения. Так как в комнатах теперь нет раскаленных предметов, опасность ожога устранена.

Большинство домашних котлов сейчас работают на мазуте или на газе, хотя когда-то был популярен уголь. Независимо от того, какое топливо используется, нужно как-то обеспечить его постоянную подачу в топку, причем с определенной скоростью, иначе огонь может заглохнуть. Забрасывать уголь в топку лопатой — тяжелая и грязная работа, поэтому была изобретена автоматическая шнековая подача. Такие системы до сих пор используют в усовершенствованных дровяных печах или печах на гранулированном топливе.

Большая часть современных котлов на жидком или газообразном топливе также автоматизирована. Для подачи топлива в топку в них используется перепад давления между топливным резервуаром и топкой. В газовом баллоне давление пропана создается благодаря его испарению; в магистральных газовых линиях давление поддерживают газовые компании — поставщики газа. Газ устремляется в область более низкого давления в топке и попадает в нее через множество маленьких отверстий в горелке. Жидкое топливо обычно впрыскивают в топку под давлением с помощью небольшого электрического насоса, и оно образует в топке аэрозоль.

Так как котлы, работающие на газе или мазуте, включаются автоматически, когда возникает потребность в тепле, их горелки приходится снова и снова поджигать. Нужен какой-то источник начальной энергии активации, необходимой для запуска химической реакции горения. Во многих газовых котлах предусмотрен запальник — маленькая горелка, фитилек которой постоянно горит и зажигает основную горелку, когда в последнюю начинает поступать топливо. Газовые котлы других систем и почти все котлы на жидком топливе используют ток высокого напряжения, создающий искру, которая зажигает основную горелку. Электроподжиг “по требованию” — более сложный механизм, чем запальник, но зато в этом случае топливо вообще не расходуется, пока не понадобится тепло.

В любом случае в правильно спроектированном котле имеется температурный датчик, который реагирует на неполадки — например, запальник вдруг потух или основная горелка не зажглась. Если происходит нечто подобное, датчик



отключает подачу топлива до устранения неисправности. К сожалению, в некоторых устройствах на жидком топливе такого предохранительного механизма не имеется, и такие котлы печально известны тем, что даже при потухшей горелке продолжают подавать топливо и разливают на полу подвальных помещений (где их обычно устанавливают) целые танкеры мазута.

Объем воздуха, проходящий через топку, регулируется заслонками в дымоходе. Горячие дымовые газы имеют низкую плотность, поэтому поднимаются вверх благодаря силам выталкивания и должны пройти мимо заслонки. Закрывая ее, вы сужаете проход и ограничиваете поток. Если поток воздуха слишком велик, часть тепловой энергии улетучивается через дымоход, если поток слишком мал — происходит неполное сгорание топлива (об опасности, которую представляет собой закрытая заслонка, см. ❸).

Когда топливо горит и через топку проходит нужный объем воздуха, котел готов отдавать тепло воде или комнатному воздуху. Горячие дымовые газы проходят по одной стороне теплообменника, в то время как вода или воздух из помещения идут по другой стороне. Два потока разделены металлической поверхностью, которая проводит тепло от горячих дымовых газов к более холодному воздуху или воде. Дымовые газы охлаждаются, воздух или вода нагреваются. К тому моменту, когда дымовые газы попадают в дымоход, они уже успевают существенно остыть, поэтому с ними теряется сравнительно небольшая часть тепловой энергии.

Лучшие конструкции котлов даже позволяют конденсировать содержащийся в дымовых газах водяной пар в воду, прежде чем эти газы уйдут через дымоход или выхлопную трубу. Как мы узнаем в следующем разделе, конденсация влаги высвобождает теплоту испарения — химическую потенциальную энергию, содержащуюся в несвязанных молекулах воды. Теплота испарения воды очень велика, поэтому конденсационные котлы, улавливая это дополнительное тепло и передавая его комнатному воздуху, значительно повышают свою энергоэффективность. Если вы собираетесь установить новый отопительный прибор, газовый или на жидком топливе, самым разумным выбором будет конденсационный котел.

## Отопительные системы

Существует несколько типов отопительных систем, которые можно подключить к котлу. В домах с воздушным отоплением теплообменник передает тепло непосредственно воздуху внутри помещения и распределяет этот теплый воздух с помощью системы воздуховодов. Системы воздушного отопления различаются по способу подачи теплого воздуха в воздуховод.

В системах гравитационного воздушного отопления нет вентилятора, который нагнетал бы теплый воздух. Вместо этого для циркуляции используется естественная конвекция. Котел устанавливают в подвале, чтобы под действием силы выталкивания теплый воздух с низкой плотностью поднимался бы в комнаты. При этом распределительные решетки и заслонки обычно делают на уровне пола, чтобы теплый воздух, поднимаясь вверх, нагревал бы весь объем комнаты. Плотный холодный воздух собирается вблизи пола, где попадает в воздухозаборник и оттуда в отопительную систему, чтобы вновь нагреться.

Несмотря на то что гравитационное отопление удовлетворительно работает в некоторых типах домов и давно применяется, оно не так удобно и эффективно, как системы с принудительной циркуляцией. Из-за вязкости воздуха его движение по воздуховодам замедляется, естественная циркуляция ослабевает и в удаленные от котла комнаты поступает мало тепла.

В системах с принудительной циркуляцией воздух втягивается в трубу вентилятором, проходит через теплообменник и по воздуховоду возвращается в помещение. Вентилятор играет роль насоса, увеличивая энергию воздуха, так что воздух быстро движется и легко преодолевает потери энергии из-за вязкости. Так как принудительная циркуляция не зависит от сил выталкивания, котел можно поставить в любом месте дома.

Подобно гигантскому фену для сушки волос, вентилятор с легкостью продувает теплым воздухом все помещения дома вне зависимости от их расположения. Более того, вентилятор обладает достаточной энергией, чтобы прогнать воздух через фильтры, расположенные на входе в систему. Фильтр отопительной систе-

❸ Когда к пламени в топке имеет доступ слишком мало воздуха, топливо не сгорает полностью — так, чтобы остались только вода и углекислый газ. Вместо этого может образоваться монооксид (закись) углерода — токсичный угарный газ. Молекула монооксида углерода образует прочную связь с гемоглобином (этот компонент крови переносит кислород), что может привести к удушью и смерти. Правильно отрегулированная заслонка поможет предотвратить подобное, хотя еще более разумная мера предосторожности в любом доме с печью или топкой — установка детектора угарного газа.

мы, как и фильтр пылесоса, поглощает пыль из циркулирующего воздуха и очищает его. Но очень важно своевременно чистить фильтры — если они забиты пылью, то будут потреблять слишком много энергии и препятствовать нормальной циркуляции воздуха.

Другой широко распространенный способ отопления — водяные радиаторы (батареи). Тепловая энергия передается от горячих дымовых газов воде, которая затем течет по трубам, проходя через радиаторы, установленные в каждой комнате. От радиаторов тепло передается в помещение посредством конвекции и излучения. Отдав большую часть своей избыточной тепловой энергии, остывшая вода возвращается в теплообменник, чтобы вновь нагреться.

В гравитационных системах водяного отопления горячая вода движется исключительно благодаря гравитации. Если котел установлен в подвале, горячая вода буквально всплывает к радиаторам, а остывшая опускается обратно. Но в большинстве систем активная циркуляция воды достигается с помощью насосов. Системы с принудительной циркуляцией легче контролировать и регулировать, чем гравитационные. К тому же их можно использовать для подогрева водопроводной питьевой воды. Так как вода из радиаторов недостаточно чистая, горячую воду получают, пропуская чистую холодную водопроводную воду через теплообменник с горячей циркуляционной водой из радиаторов.

Иногда водяные панельные радиаторы встраивают непосредственно в стены или пол. Эта концепция получила название коллекторно-лучевой системы. Она особенно подходит для домов, в которых нет подвала и пол, находящийся на уровне земли, в противном случае оставался бы холодным. Поскольку коллекторно-лучевые радиаторы спрятаны в полу или стенах, они не занимают места в помещениях. Бывает, что такие системы устанавливают даже под подъездными дорожками, чтобы на них не задерживались снег и лед. Недостаток водяного отопления заключается в том, что накипь или повреждение трубы могут воспрепятствовать нормальному току горячей воды и снизить эффективность обогрева. Если же, как это часто делают, трубы проходят внутри бетонных стен или перекрытий, их не так-то легко очистить или заменить.

Еще одна распространенная разновидность систем отопления использует водяной пар. При паровом отоплении подвальный котел доводит воду в бойлере до кипения, так что верхняя часть бойлера наполняется паром. Пар гораздо легче воды, поэтому он поднимается по трубам и проходит через радиаторы во всем доме. Здесь пар вновь конденсируется, отдавая при этом огромное количество тепла (о кипении и конденсации я расскажу в следующем разделе), и вода направляется обратно в котел, по пути предварительно нагреваясь от труб, по которым навстречу идет пар. Паровые радиаторы гораздо горячее (около 100 °C), чем водяные (менее 80 °C), поэтому маленький паровой радиатор столь же эффективен, как гораздо больший по размеру водяной. Кроме того, вязкость пара ниже, чем вязкость воды, поэтому он быстрее движется по трубам и быстрее нагревает радиаторы. Но притом что паровое отопление прекрасно обогревает помещения, оно гораздо опаснее водяного. Паровые радиаторы так раскалены, что о них можно обжечься. Я вырос при паровом отоплении — такие радиаторы были и у нас дома, и в школе, — и было очень интересно класть на батарею цветные восковые мелки и потом смотреть, как они плавятся. Несмотря на то, что я много раз обжигался и время от времени меня ловили за этим занятием то родители, то учителя, это не очень-то меня останавливало.

Пар по-прежнему широко используется для обогрева производственных и коммерческих помещений, но паровые радиаторы уже практически исчезли. В результате этого сомнительного “прогресса” потеряны целые поколения художников, работающих в технике расплавленного воскового мелка...

Ни одна из подобных систем не вырабатывает тепло непрерывно. Обычно она управляется термостатом — устройством, которое включает котел или циркуляционный насос лишь в том случае, если температура в помещении падает ниже заданной величины. Далее в этой главе я объясню, как работает термостат. В некоторых домах для управления всей системой отопления используется один термостат, в некоторых установлены отдельные термостаты в разных комнатах или частях дома. Когда температура падает значительно ниже заданной, термостат включает котел, вентилятор или насос, чтобы запустить поток горячего воздуха, воды или пара, и выключает их, как только температура вновь достигнет нужного уровня.

Хорошо, когда в холодный день есть возможность посильнее включить отопление, но иногда нам нужно всего лишь разогреть обед. Поскольку мы уже обсудили физические явления, связанные с работой плит, духовок и прочих приспособлений, на которых можно готовить пищу, давайте теперь посмотрим, как же, собственно, работают эти устройства.

Современные технологии предлагают нам десятки вариантов классической кухонной конфорки, но физические принципы процесса подогрева пищи не так уж изменились. Когда вы включаете конфорку, ее температура повышается и тепло начинает перетекать к соседним, более холодным предметам. Если на конфорке стоит холодная кастрюля с супом, тепло передается от конфорки к кастрюле, а от нее — к супу. Но хотя кастрюля может показаться простым посредником между конфоркой и пищей, на самом деле она способна сыграть важную роль в компенсации недостатков конфорки. Именно эта способность отличает хорошую кастрюлю от плохой.

Каким образом тепло передается к кастрюле, зависит от типа конфорки. Газовые конфорки передают тепло внешней поверхности кастрюли в основном с помощью конвекции — горячий газ, образующийся при горении, поднимается и обволакивает кастрюлю снизу и с боков, передавая тепло непосредственно ее дну и стенкам. Правильно спроектированная горелка относительно равномерно распределяет тепло, но равномерность нагревания зависит также и от положения пламени. Если пламя расположено слишком низко, оно обычно разогревает центральную часть кастрюли сильнее, чем ее края.

Обычные электрические конфорки передают тепло кастрюле посредством теплопроводности, конвекции и излучения. Если бы конфорка и кастрюля идеально прилегали друг к другу, то основным механизмом передачи тепла была бы теплопроводность. Но на практике между двумя поверхностями неизбежно возникают зазоры, через которые тепло передается путем конвекции и излучения. Наиболее интенсивный поток тепла проходит через точки соприкосновения кастрюли и конфорки, поэтому электрическая конфорка нагревает кастрюлю не так равномерно, как газовая. Особенно неравномерно работает обычная спиральная электроплитка, показанная на **рис. 7.1.8**. Более совершенные электрические конфорки снабжены не спиралью, а варочной поверхностью либо приспособлениями, поддерживающими кастрюлю чуть-чуть выше нагревательного элемента. В последнем случае все тепло передается конвекцией и излучением, и обогрев становится равномерным. Тем не менее даже лучшие электрические конфорки не обеспечивают абсолютно равномерного нагрева. Впрочем, и газовые горелки тоже не идеальны.

Если бы проблема заключалась только в передаче тепла, все кастрюли были бы одинаково хороши и можно было бы выбирать их исключительно по внешнему виду. Однако приготовление пищи на плите — не настолько простой процесс, и разные кастрюли ведут себя совершенно по-разному.

Наиболее важное различие между кастрюлями заключается в их способности компенсировать несовершенство конфорки. Если кастрюля нужна вам не только для того, чтобы кипятить воду, то вы оцените ту, которая обеспечивает равномерное прогревание пищи независимо от характеристик конфорки.

Идеальная кастрюля способна получать тепло в любой точке своей наружной поверхности и затем быстро распределять это тепло по внутренней поверхности, чтобы вся эта поверхность имела одинаковую температуру. Тогда тепло будет равномерно переходить от кастрюли к содержимому и еда не пригорит. Короче говоря, хорошая кастрюля должна предохранять пищу от любых недостатков подогрева, связанных с конфоркой. Даже если только половина такой кастрюли помещается на конфорке, это не скажется на качестве содержимого.

Кастрюли сильно различаются и тем, как они распределяют тепло внутри своего объема. Поскольку тепло естественным образом само переходит от более горячих тел к холодным, теплопроводность будет всегда направлена на то, чтобы уменьшить разницу температур внутри кастрюли. К сожалению, не все кастрюли проводят тепло достаточно хорошо для того, чтобы нагреть весь объем содержимого до одной и той же температуры, а плохие кастрюли вообще с этим не справляются. Если вы поставите плохую кастрюлю на спираль электроплитки, то дело, скорее всего, кончится тем, что вам придется соскребать со дна спиралевидные остатки пригоревшей пищи.



**Рис. 7.1.8.** Такая электроплитка дает крайне неравномерный нагрев, что может привести к подгоранию и порче кухонной посуды.

Хорошая кастрюля быстро распределяет тепло по днищу и всегда достигает теплового равновесия, то есть температура почти одинакова, независимо от способа нагрева. В этом случае у вас высокие шансы на то, что еда будет равномерно готовиться и не пригорит. Для распределения тепловых потоков в хороших кастрюлях используют толстые слои меди или алюминия. Еще лучше работало бы серебро, но это получится дороговато. В толстом дне почти всех качественных кастрюль имеется прокладка из меди или алюминия. Единственное исключение — чугунная посуда; правда, у чугуна не такая хорошая теплопроводность, как у алюминия (не говоря уже о меди), но толстый слой чугуна все-таки может обеспечить достаточно равномерный нагрев. Это одна из причин, почему не теряют популярности тяжелые чугунные сотейники и сковородки.

Нержавеющая сталь, наоборот, плохой проводник тепла, и кастрюля, целиком изготовленная из нержавеющей стали, никогда не сможет компенсировать недостатки конфорки. И хотя такая кастрюля вполне пригодна для газовой плиты, на электроплитке в ней все будет пригорать.

Даже если в днище кастрюли проложен слой меди или алюминия, от этого будет мало пользы, если этот слой слишком тонок. Кастрюля с тонким алюминиевым дном или кастрюля из нержавеющей стали с тонким, символическим слоем меди на дне никогда не обеспечит столь равномерного прогрева, как по-настоящему хорошая кастрюля. Стекланную же утварь на плите можно использовать только для разогрева жидкостей или в тех случаях, когда конфорка гарантирует исключительно равномерный нагрев.

К сожалению, кастрюли, изготовленные из чистого алюминия или меди, тоже имеют свои недостатки. Из-за относительной мягкости этих металлов поверхность таких кастрюль легко повредить. Можно, конечно, использовать медные и алюминиевые сплавы, более твердые по сравнению с чистыми металлами, но при этом снижается теплопроводность. Более того, при контакте с некоторыми продуктами медь образует токсичные соединения, поэтому посуда из чистой меди имеет весьма ограниченное применение. Из этого следует, что самые лучшие кастрюли — комбинированные, то есть такие, где медь и алюминий используются для распределения тепла, но при этом они заключены в защитную оболочку из более твердых, безвредных и легко очищаемых материалов.

Анодированный алюминий — один из вариантов защиты алюминиевых кастрюль и сковородок. При электрохимическом анодировании на поверхности алюминия образуется толстый слой оксида. Оксид алюминия — очень твердое вещество: в природе он встречается в виде корунда (прозрачные цветные кристаллы этого минерала мы называем сапфирами и рубинами), и его практически невозможно поцарапать. Чистый алюминий также образует слой оксида при контакте с воздухом, но этот слой недостаточно толстый для того, чтобы защитить металл. В то же время анодированный алюминий очень устойчив к повреждениям, и защитный слой в этом случае имеет достаточную толщину, поэтому кастрюли из такого алюминия тоже пользуются спросом.

Еще один распространенный тип утвари из комбинированных материалов — это кастрюля или сковорода, в которой толстый слой алюминия или меди помещен между двумя защитными слоями из нержавеющей стали. Твердая нержавеющая сталь обеспечивает защиту от царапин и легкую очистку, а медь или алюминий — равномерный прогрев пищи. Иногда внутреннее покрытие из нержавеющей стали заменяют слоем антипригарного пластика, в других случаях (когда внешний вид утвари не так уж важен) обходятся вообще без покрытия. Так или иначе, по-настоящему хорошую кастрюлю трудно изготовить без толстого слоя меди или алюминия в ее дне.

Конечно же, вы не хотите, чтобы ручки вашей кастрюли хорошо проводили тепло, — иначе вам придется готовить, не снимая толстых рукавиц. Нержавеющая сталь или пластик — плохие проводники тепла, и, следовательно, из этих материалов получаются отличные ручки. Вряд ли стоит использовать для ручек алюминий или медь, так что из всех качественных кастрюль только у чугунных ручки хорошо проводят тепло. Хозяйки, которые любят чугунные сковородки, обычно готовы носить кухонные рукавицы и иногда мириться с одним-двумя случайными ожогами.

## Традиционные и конвекционные духовки

Когда вы ставите противень или сотейник в духовку, процесс приготовления пищи отличается от того, что происходит на конфорке. Продукты соприкасаются с противнем точно так же, как с кастрюлей или сковородой, однако в духовке тепло необязательно проходить через противень, чтобы достичь продуктов. Более того, теплопроводность в данном случае не вносит заметного вклада в перенос тепла от источника к продуктам; весь процесс приготовления пищи в духовке происходит с помощью конвекции и излучения. Благодаря этому пища готовится более равномерно: неоднородность разогрева — беда многих электрических плит — как правило, не наблюдается в электрических и газовых духовках.

Впрочем, существует как минимум три способа приготовления пищи в духовках (не считая готовки в микроволновой печи, о которой речь пойдет в разделе 13.2). Говоря “три”, я имею в виду обычное запекание, запекание в печке-гриле и запекание в конвекционной печи (или аэрогриле), которую более точно можно назвать печью с принудительной конвекцией.

При обычном запекании вы помещаете продукты в духовку, в нижней части которой расположена горелка. Тепло поднимается от горелки к еде за счет естественной конвекции и излучения. Роль конвекции состоит в том, что воздух, нагретый от горелки, поднимается вверх, обволакивая еду, и передает ей тепло. Роль излучения в том, что горелка и горячие стенки духовки со всех сторон, особенно с нижней, буквально заливают еду тепловым излучением. Так как нижняя часть запекаемых продуктов подвергается прямому воздействию конвективного тепла и тепловое излучение снизу наиболее интенсивно, запекание чаще всего и происходит снизу вверх.

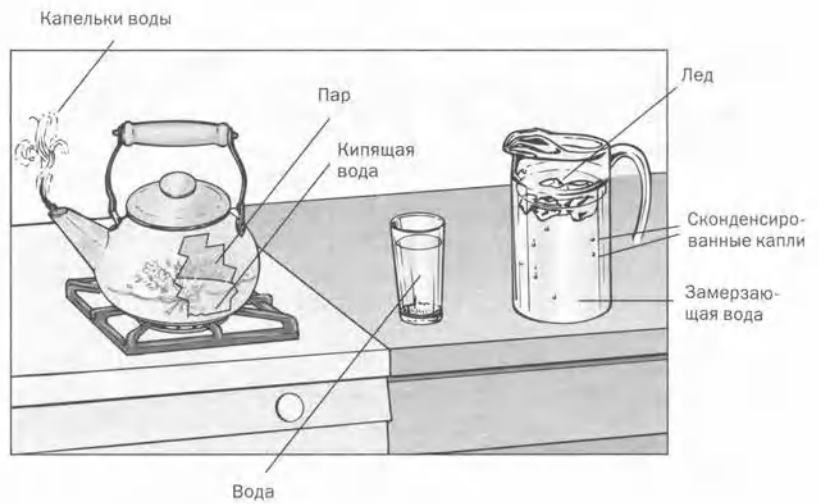
Запекание на гриле отличается тем, что здесь источник тепла расположен в верхней части духовки. В этом случае тепло передается пище только за счет излучения. Конвекция отсутствует, поскольку нагретый воздух поднимается в верхнюю часть духовки и там и остается; он так и не соприкасается с пищей. Единственный способ, каким тепло может быть передано от горелки к пище, — электромагнитное излучение, падающее на верхнюю часть запекаемых продуктов. Поэтому запекание в печке-гриль происходит сверху вниз.

Кирпичная печь для пиццы действует как духовка-гриль, несмотря на то что дрова горят на нижней поверхности (на полу) печи. Поскольку дрова и пицца лежат бок о бок на одной и той же кирпичной поверхности, теплопроводность и конвекция не могут перенести большое количество тепла от огня к пицце. Кирпич — очень плохой проводник тепла, и горячий воздух от пылающих дров поднимается вверх, даже не касаясь пиццы. Остается только теплообмен излучением. В то время как некоторая часть теплового излучения непосредственно идет от огня к пицце, большая часть тепла, которое достается пицце, отражается вниз от кирпичного свода печи. Тепловые потоки поднимаются от огня к своду и путем конвекции, и путем излучения. Нагретый кирпич свода, в свою очередь, излучает тепло на расположенную под ним пиццу. Таким образом, пицца запекается сверху вниз, причем нагрев идет почти полностью за счет излучения. Это одна из причин того, что пицца, выпеченная в кирпичной дровяной печи, карамелизована сверху и почти никогда не подгорает снизу.

Наконец, существуют еще конвекционные печи, которые на самом деле следовало бы называть принудительно конвекционными, поскольку в них, в отличие от обычных духовок, имеется вентилятор.

С помощью этого вентилятора горячий воздух в конвекционной печи распространяется быстро и целенаправленно. Из-за быстрого потока воздуха внутри духовки конвекция становится доминирующим механизмом передачи тепла, которое одновременно действует и на верхнюю часть запекаемого блюда, и на нижнюю. Поэтому еда не только готовится быстрее, но и пропекается более равномерно.

Более того, в конвекционной печи можно запекать больше еды, чем в обычной духовке. Так как естественная конвекция зависит от слабых сил выталкивания, поднимающих горячий воздух, вязкость и силы сопротивления могут повлиять на воздушный поток. В перегруженной духовке продукты не будут запекаться равномерно. Но в конвекционной печи воздушный поток обладает такой высокой энергией, что легко проходит через относительно небольшие просветы, и даже тесно лежащие продукты равномерно пропекутся.



## 7.2 Вода, пар и лед

По всей вероятности, вода — самое важное химическое соединение в нашей повседневной жизни. Биология, климат, коммерческая деятельность, промышленность, индустрия развлечений — повсюду значение воды настолько огромно, что она вполне заслуживает отдельного раздела в этой книге. Заметим также, что вода в высшей степени наглядно демонстрирует три классических состояния вещества — твердое, жидкое и газообразное; на примере воды особенно ярко видно, какую роль играет тепло в переходе из одного состояния в другое. Большую часть наших знаний о воде можно приложить и к другим веществам, однако некоторые особенности воды делают это соединение почти уникальным. Вода — воистину удивительная вещь!

### Состояния вещества: твердое, жидкое и газообразное

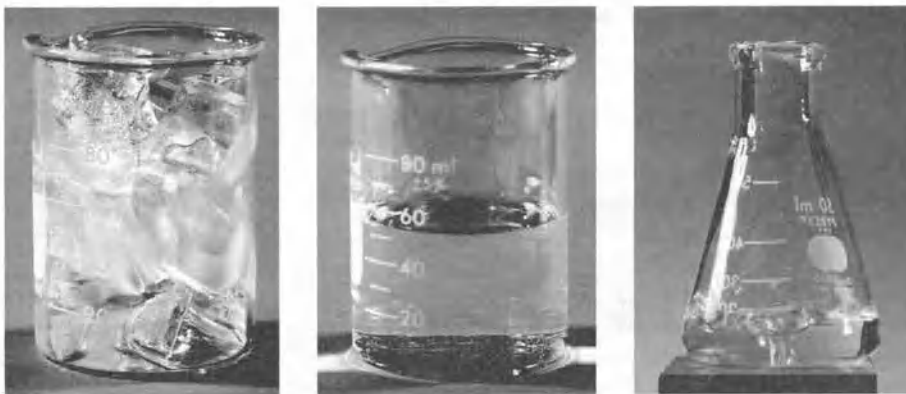
Как и большинство веществ, вода существует в трех различных формах, или фазах: твердый лед, жидкая вода и газообразный пар (рис. 7.2.1). Фазы различаются способностью к изменению формы и объема. Лед — твердый, жесткий и несжимаемый; вы не можете изменить объем или форму кубика льда. Вода — это жидкость, то есть она текучая, но несжимаемая; вы можете изменить ее форму, налив в кувшин, но не можете изменить однажды заданный объем. Пар — это газ, он и текучий, и сжимаемый; с помощью обыкновенного чайника вы можете поменять и его форму, и его объем.

Эти различия отражают разницу в микроструктуре пара, воды и льда. Пар (водяные испарения) — это газ, скопление отдельных молекул, находящихся в постоянном движении благодаря термической энергии. Молекулы воды непрерывно двигаются внутри емкости, периодически сталкиваясь друг с другом и со стенками. Они равномерно распределены по объему и могут приспосабливаться к любым изменениям в форме и размере сосуда. Увеличение объема просто снижает давление и плотность пара.

В газообразном состоянии, будучи независимы друг от друга, молекулы воды обладают существенным запасом химической потенциальной энергии. Часть этой энергии высвобождается, когда молекулы взаимодействуют, образуя обычную жидкую воду. Жидкая вода — это неупорядоченное\* скопление молекул, связанных друг с другом химическими связями. Поскольку эти связи не очень сильны, молекулы могут, используя тепловую энергию, разрывать их и затем “менять партнера”. Процессы постоянного разрыва и восстановления связей позволяют воде сохранять текучесть и изменять форму. Несмотря на нестабильность связей, они достаточно сильны, чтобы держать молекулы вместе так компактно, что даже сдавливание не может прижать их теснее. Именно поэтому вода несжимаема.

Молекулы воды могут высвободить еще больше химической потенциальной энергии, если плотно упакуются в виде льда. Лед — твердое вещество, совокупность жестко связанных между собой молекул. Подобно большинству твердых

\* Расположение молекул воды не настолько хаотическое и неупорядоченное, как у молекул газа. В воде, в зависимости от температуры, существуют ассоциаты молекул, связанных водородными связями, — этикие островки упорядоченности, плавающие в общем хаосе. Чем ниже температура, тем выше степень упорядоченности.



**Рис. 7.2.1.** Три состояния воды: твердое (лед), жидкое (вода), газообразное (пар). Эти агрегатные состояния часто сосуществуют: лед покрыт жидкой водой, над кипящей водой клубится пар.

тел, лед является кристаллом — молекулы воды в нем располагаются в виде упорядоченной решетки, весьма протяженной, благодаря которой возникают фантастические узоры снежинок и морозных рисунков на стекле. Кристаллическая структура льда настолько жестко связывает молекулы воды, что последние не могут использовать тепловую энергию для “смены партнеров” по химической связи, и поэтому лед не может менять форму.

Так же как уложенные в аккуратную горку апельсины на магазинной полке занимают меньший объем, чем то же количество фруктов, сваленных в беспорядочную кучу, так и твердое кристаллическое вещество почти всегда занимает меньший объем, чем неупорядоченная жидкость той же массы. Твердая фаза типичного вещества, таким образом, всегда более плотная, чем жидкая фаза того же вещества, поэтому твердая фаза типичного вещества тонет в его же жидкой фазе.

Исключение из этого правила только одно — вода. Кристаллическая структура льда является необычайно рыхлой, а его плотность — на удивление низкой. Практически уникальное вещество в природе, лед имеет меньшую плотность, чем жидкая вода, и по этой причине лед плавает на поверхности воды. Вот почему айсберги плавают в открытом океане, а кубики льда — в вашем бокале. Собственно говоря, вода достигает наибольшей плотности при температуре около 4 °С.

## Таяние льда и замерзание воды

Лед в морозильнике имеет очень низкую температуру, обычно около  $-18$  °С. Когда вы достаете его и кладете на теплый стол, льду передается тепло и его температура возрастает. Лед остается твердым, пока его температура не достигнет 0 °С. В этот момент лед прекращает нагреваться и начинает таять. Таяние — изменение агрегатного состояния, переход от упорядоченности твердой фазы к неупорядоченности жидкой. Этот переход происходит, когда под действием тепла разрывается часть связей между молекулами воды и они получают возможность двигаться относительно друг друга. Тающий лед превращается в воду, теряя свою жесткую форму и кристаллическую структуру.

Ноль градусов Цельсия — температура плавления льда, температура, при которой тепло, добавленное льду, расходуется на разрушение его связей и превращает его в воду, а не делает его более теплым. Смесь льда и воды сохраняет температуру 0 °С, пока весь лед не растает\*. Когда остается только вода, тепло снова вызывает повышение ее температуры. Тепло, необходимое для преобразования определенной массы твердого вещества в жидкость без изменения ее температуры, называется скрытой теплотой плавления. Связи между молекулами льда достаточно сильные, поэтому у льда огромная скрытая теплота плавления: при 0 °С требуется около 333 000 Дж тепла для преобразования 1 кг льда в 1 кг воды с такой же температурой. Поскольку теплоемкость воды составляет 4190 Дж/(кг × К), такое же количество тепла способно повысить температуру 1 кг жидкой воды почти до 80 °С. Таким образом, чтобы растопить кубик льда, нужно столько же тепла, чтобы нагреть образовавшуюся воду едва ли не до кипения.

Скрытая теплота плавления вновь проявляется, когда вы охлаждаете воду до температуры плавления, и вода начинает замерзать. Замерзание — другой фазо-

\* Естественно, речь идет о ситуации, когда смесь передается тепловая энергия — например, если сосуд с водой и льдом находится в теплой комнате. Если же лед вынести зимой на мороз, то смесь будет сохранять температуру, пока вся вода не замерзнет.

вый переход, превращение неупорядоченной жидкой в упорядоченную твердую фазу. При отводе от воды тепла при  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  вода, вместо того чтобы становиться холоднее, превращается в лед. Поскольку молекулы воды высвобождают энергию при образовании связей друг с другом и формировании кристаллов льда, вода при замерзании выделяет тепло. Тепло, выделяемое при преобразовании определенной массы жидкого вещества в твердое без изменения его температуры, — та же скрытая теплота плавления. Нужно добавить определенное количество тепла, чтобы растопить лед, и нужно отвести от воды такое же количество тепла, чтобы снова превратить ее в лед.

## Фазовое равновесие: взлет и посадка

Мы уже знаем, что лед имеет температуру плавления; теперь давайте выясним, почему она у него есть. Для этого нам нужно рассмотреть границу раздела между твердым льдом и жидкой водой. При любом соприкосновении двух фаз между ними происходит обмен молекулами воды через границу раздела. Молекулы воды постоянно отрываются ото льда и переходят в воду и так же часто покидают воду, чтобы “приклеиться” ко льду. Иными словами, молекулы воды постоянно “взлетают” со льда и “сажаются” на него, словно самолеты в загруженном аэропорту в час пик.

Мы не можем видеть отдельных “взлетов” и “посадок”, но можем наблюдать суммарный эффект. Если число “взлетов” превосходит число “посадок”, лед постепенно превратится в воду. Если “посадок” больше, чем “взлетов”, вода постепенно превратится в лед. И если два процесса уравновешивают друг друга, вода и лед будут сосуществовать неопределенно долго — состояние, известное как фазовое равновесие.

Решающую роль в этом процессе играет температура, потому что от нее зависит интенсивность, с которой молекулы покидают лед. Чем теплее лед, тем чаще молекулы на его поверхности могут скопить достаточно тепловой энергии, чтобы оторваться. При температуре ниже температуры плавления молекулы воды отрываются ото льда слишком редко, чтобы уравновесить процесс приземления, и вода полностью превращается в лед. Если температура выше температуры плавления, молекулы воды отрываются от льда так часто, что число отрывов превосходит число приземлений, и лед полностью переходит в воду. И только при температуре плавления количество “взлетов” и “посадок” уравновешивается таким образом, что вода и лед могут сосуществовать в состоянии равновесия.

Огромная скрытая теплота плавления льда оказывает стабилизирующее влияние на фазовое равновесие между льдом и водой. При любом смешивании воды со льдом температура смеси быстро устремится к  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Причина в том, что, если температура смеси выше  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , лед начнет таять — произойдет изменение агрегатного состояния, при котором поглотится теплота плавления, и температура смеси, соответственно, снизится в сторону нуля. И если температура смеси была ниже  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , часть воды замерзнет — при таком фазовом превращении выделится теплота плавления, температура смеси поднимется и станет ближе к нулю.

До тех пор пока в смеси не закончится лед или вода, ее температура, достигнув  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , будет оставаться на этом уровне, даже если вы будете добавлять или отводить тепло. Любое добавленное тепло будет израсходовано на плавление льда, но не на увеличение температуры. Любой отвод тепла приведет к замерзанию дополнительного количества воды, но не к понижению температуры смеси. Вот почему ваш стакан с ледяной водой какое-то время сохраняет температуру  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  даже в самую жаркую или холодную погоду (рис. 7.2.2). Более подробно о таянии льда и о том, почему лед скользкий, см. 1.

## Испарение воды и конденсация пара

Открытая поверхность воды представляет собой еще одну активную границу раздела между фазами, но на этот раз речь идет об обмене молекулами между жидкой водой и газообразным паром. Молекулы воды активно вылетают из воды в пар и “приземляются” на воду из пара, опять же как самолеты в крупном аэропорту.

Сам по себе обмен молекулами интересен, но гораздо важнее его суммарный эффект. Если больше молекул покидает воду, чем возвращается в нее, вода постепенно испаряется и переходит в пар. Испарение — фазовое превращение жидкости в газ.



Рис. 7.2.2. Лед и вода могут сосуществовать только при  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  — температуре плавления льда.



С другой стороны, если больше молекул возвращается в воду, чем покидает ее, пар постепенно конденсируется в воду. Конденсация — фазовое превращение газа в жидкость. И если “взлеты” и “посадки” сбалансированы, вода и пар сосуществуют в состоянии фазового равновесия.

Эти два фазовых перехода имеют колоссальное значение. Так как молекулы в жидкой воде связаны друг с другом химическими связями, требуется энергия, чтобы их разъединить. И хотя связи между молекулами воды слабее, чем связи внутри молекулы, необходимо достаточно большое количество энергии, чтобы превратить воду в пар.

Тепло, необходимое для преобразования определенной массы жидкости в газ без изменения его температуры, называется скрытой теплотой испарения или, более формально, скрытой теплотой парообразования. Скрытая теплота парообразования воды поистине огромна, поскольку связи между молекулами воды на удивление трудно разорвать. Для превращения 1 кг воды при температуре 100 °С в 1 кг пара при 100 °С требуется 2 300 000 Дж тепла. Такое количество тепла повысило бы температуру 1 кг воды более чем на 500 °С!

Сильнее всего вы ощущаете эту скрытую теплоту испарения в жаркий летний день, когда пот испаряется с вашей кожи, унося при этом тепло и понижая вашу температуру. Когда молекула воды покидает вашу кожу, чтобы стать паром, она в виде химической потенциальной энергии уносит с собой больше, чем одну лишь собственную долю тепловой энергии. Таким образом, эта молекула уменьшает вашу тепловую энергию, и вам становится прохладнее.

Скрытая теплота парообразования вновь проявляется, когда пар охлаждается и молекулы воды, соединяясь, высвобождают химическую потенциальную энергию в виде тепла. Тепло, выделяемое при преобразовании определенной массы газа в жидкость без изменения его температуры, — та же скрытая теплота парообразования. Нужно добавить определенное количество тепла, чтобы выпарить воду, и нужно отвести от пара такое же количество тепла, чтобы его сконденсировать.

Огромное количество тепла, высвобождаемое при конденсации пара, часто используется для приготовления пищи или нагрева радиаторов старого образца. Когда вы готовите овощи на пару, то пар конденсируется на овощах и передает им тепло. В пароварках конденсация пара используется для передачи тепла от конфорки к внутренней емкости кастрюли.

## Относительная влажность

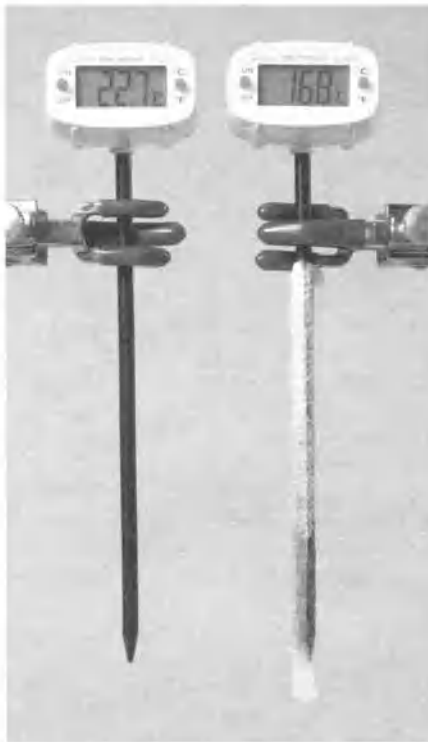
Мы уже обсудили последствия испарения и конденсации, но еще не знаем, при каких условиях они происходят. Тут опять все сводится к тем же “взлетам и посадкам” молекул воды, поэтому давайте посмотрим, когда и почему один процесс побеждает другой.

Главным индикатором, который показывает, будет ли вода испаряться или пар конденсироваться, является относительная влажность. Относительная влажность измеряет число “посадок” в процентах от числа “взлетов”. Когда относительная влажность равна 100%, обе величины равны, то есть вода и пар находятся в состоянии фазового равновесия. Если относительная влажность меньше 100%, то “посадок” меньше, чем “взлетов”, и вода испаряется. Наконец, если относительная влажность больше 100%, то “посадок” больше, чем “взлетов”, и пар конденсируется\*.

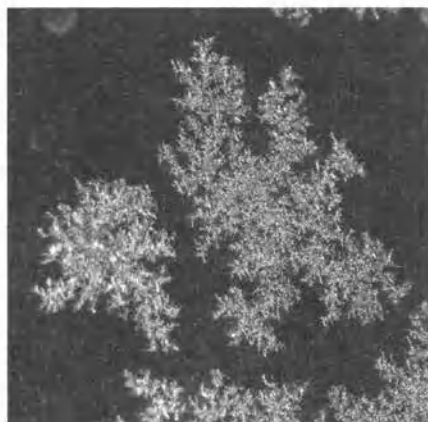
Относительная влажность зависит от температуры и плотности пара. Температура влияет на количество “взлетов”. Чем теплее вода, тем больше у нее тепловой энергии и тем чаще молекулы воды покидают ее поверхность, чтобы стать газом. Само по себе повышение температуры увеличивает интенсивность “взлетов” и таким образом снижает относительную влажность. Следовательно, повышение температуры способствует испарению. Плотность упаковки водяных молекул в паре влияет на интенсивность “посадок”. Чем выше плотность, тем чаще молекулы “приземляются” на поверхность воды и переходят в жидкое состояние. Само по себе повышение плотности увеличивает интенсивность “приземлений” и тем самым повышает относительную влажность. Таким образом, повышение плотности пара способствует конденсации. Даже когда пар смешан с воздухом, как это часто бывает, молекулы воздуха выступают в качестве “пассивных наблюдателей”. Относительная влажность воздуха определяется только плотностью самого водяного пара.

❶ Твердый лед такой скользкий потому, что на нем легко образуется тонкий слой жидкой воды, которая работает как смазка и почти устраняет силу сцепления. Механизм образования этого слоя был предметом дискуссий более столетия, и только недавно ученые окончательно объяснили скользкость льда. Оказалось, причина во взаимодействии трех факторов. Во-первых, уникальность льда в том, что повышенное давление дестабилизирует твердый лед (в отличие от жидкой воды); сжатие льда при 0 °С приводит к его таянию. Понижение температуры плавления льда с ростом давления связано с тем, что твердый лед имеет меньшую плотность, чем жидкая вода. Правда, нужно приложить высокое давление, чтобы понизить температуру плавления льда до -1 °С, поэтому этот фактор имеет значение только при особых условиях: например, когда узкое лезвие конька сильно нажимает на лед при температуре около 0 °С, лед становится более скользким благодаря этому эффекту высокого давления. Во-вторых, трение скольжения способно нагреть тонкий поверхностный слой льда так, чтобы расплавить его, даже если температура льда в этот момент доходит до -35 °С. Этот эффект трения объясняет внезапную и резкую потерю сцепления, которая происходит сразу после того, как нога начинает скользить на льду. Движение лыж и санок основано на потере сцепления при начале скольжения, которого автомобильные шины стараются избежать. В-третьих, оказалось, что на поверхности кристаллического льда имеется слой некристаллических молекул, вследствие чего жидкоподобные свойства начинают проявляться даже при -33 °С. При повышении температуры жидкоподобный слой утолщается, то есть лед становится более скользким по мере того, как температура приближается к температуре его плавления.

\* Относительная влажность показывает фактическое содержание влаги по сравнению с максимально возможным количеством влаги в данном веществе (в нашем случае — в воздухе). Относительная влажность воздуха 50% означает, что в воздухе присутствует половина от максимально возможного при данной температуре количества водяного пара. Эта величина не может превышать 100% (за исключением экзотических случаев состояния перенасыщенного пара без центров его конденсации, которое весьма редко наблюдается в природе). Только при 100% относительной влажности не происходит ни испарения, ни конденсации воды. При влажности менее 100% вода испаряется. Конденсация влаги из воздуха возможна тогда, когда вода присутствует в воздухе не только в виде пара, но и в виде мельчайших капелек тумана, которые могут появиться при охлаждении воздуха с относительной влажностью 100%. Так выпадает утренняя роса.



**Рис. 7.2.3.** Определение относительной влажности воздуха с помощью двух термометров, колба одного из которых (справа) обернута влажной тканью. Испарение охлаждает “влажный” термометр на величину, связанную с относительной влажностью воздуха. Чем суше воздух, тем холоднее становится “влажный” термометр.



**Рис. 7.2.4.** Эти морозные узоры образовались, когда влага из воздуха десублимировалась непосредственно в виде кристаллов льда на холодной поверхности окна автомобиля.

Не сосчитать, как часто в нашей повседневной жизни мы сталкиваемся с относительной влажностью. Когда относительная влажность низкая, влага быстро испаряется и воздух кажется сухим. Потоотделение успешно вас охлаждает. При высокой (около 100%) относительной влажности влага почти не испаряется, воздух кажется сырым. Выделяющийся пот прилипает к коже и не охлаждает ее.

А вот когда относительная влажность превышает 100%, например при резком падении температуры, пар начинает конденсироваться везде и всюду. Капли воды образуют росу на всех поверхностях или формируются непосредственно в воздухе в виде тумана, измороси или облака. Если влажность остается высокой, эти капли постепенно растут и в конечном итоге выпадают в виде дождя.

Относительную влажность можно измерять, наблюдая охлаждение, которое сопутствует испарению. Наиболее распространенная схема включает два термометра (**рис. 7.2.3**), один из которых внизу обернут влажной тканью (справа). Вода испаряется с влажной ткани и охлаждает термометр, пока не достигается фазовое равновесие между водой и водяным паром в воздухе. Тогда испарение прекращается. Чем суше воздух, тем сильнее охлаждается термометр. Сравнительные показания двух термометров можно использовать для определения относительной влажности воздуха (как правило, при помощи специальных таблиц).

## Сублимация льда и десублимация (депозиция) пара

Мы исследовали фазовые переходы между льдом и водой и между водой и паром. Осталось рассмотреть переход между льдом и паром. Как ни странно, молекулы воды могут покидать лед и становиться паром, равно как и из пара “приземляться” на лед и становиться льдом. В действительности лед и пар постоянно обмениваются молекулами воды даже при полном отсутствии жидкой воды.

Как и во всех аналогичных случаях, этот обмен молекулами воды происходит на поверхности льда, то есть на границе раздела фаз между льдом и паром. Так как нас интересует главным образом суммарный эффект, вопрос снова сводится к соотношению интенсивности “взлетов” и “посадок”. Если молекулы отрываются ото льда чаще, чем “приземляются”, то лед сублимируется. Сублимация — фазовый переход твердого вещества в газ. И если молекулы “приземляются” на лед чаще, чем “взлетают” с него, то пар десублимируется. Десублимация (реже употребляется термин “депозиция”) — это фазовый переход газа в твердое вещество. Еще раз отметим, что относительная влажность измеряет интенсивность “посадок” в процентах от интенсивности “взлетов”. При относительной влажности 100% лед и пар находятся в состоянии фазового равновесия.

Если относительная влажность меньше 100%, лед сублимируется. Эта закономерность объясняет целый ряд известных явлений. В сухую холодную погоду снег постепенно исчезает с земли без всякого таяния. При низкой относительной влажности в саморазмораживающемся морозильнике ледяные кубики усыхают до миниатюрных размеров. Если вы оставите пищу открытой в этом же морозильнике, она в конце концов полностью высохнет. И хотя на домашней кухне этот “морозный ожог” — досадная неприятность, в промышленных условиях сублимация используется для приготовления замороженных обезвоженных продуктов.

Наконец, когда относительная влажность больше 100%, пар десублимируется. Этот процесс лежит в основе еще нескольких известных явлений. На холодных окнах и лужайках, окутанных влажным воздухом, возникают морозные узоры (**рис. 7.2.4**). В морозильниках старого образца из-за высокой относительной влажности нарастает снег и иней, поэтому они нуждаются в периодическом размораживании. А в облаках вырастают снежинки и затем грациозно опускаются на землю.

## Кипение воды

Рассмотрев три фазы и шесть фазовых переходов, мы, казалось бы, исчерпали все варианты. Как же в эту картину вписывается кипение? Кипение — это просто ускоренная форма испарения, при которой пузырьки чистого пара образуются путем испарения внутри объема воды. Чтобы лучше понять кипение, проанализируем взаимодействие между водой и паром.

Предположим, мы поместили некоторое количество воды в герметичный сосуд, из которого откачан воздух, и держим сосуд при постоянной температуре. Вода будет испаряться в виде пара, пока относительная влажность внутри сосуда не станет равна 100%. В этот момент вода и пар достигнут состояния фазового равновесия; плотность пара будет именно такой, чтобы молекулы воды опускались на воду так же часто, как ее покидали. Пар, имеющий равновесную плотность, называется насыщенным.

Плотность насыщенного пара зависит от температуры сосуда. При нагревании молекулы воды начнут испаряться более активно и плотность пара повысится, чтобы интенсивность “посадок” уравновесила возросшую интенсивность “взлетов”. Таким образом, плотность насыщенного пара возрастает с повышением температуры.

Плотность насыщенного пара вместе с его температурой определяют давление пара, то есть давление внутри сосуда. Если мы нагреем сосуд, возрастут и плотность насыщенного пара, и давление. При близких к комнатной температурах давление насыщенного пара составляет лишь несколько процентов от атмосферного давления. Но по мере того как температура приближается к 100 °С, давление насыщенного пара приближается к атмосферному.

С учетом этого предположим, что мы поместили пузырек чистого насыщенного пара в воду комнатной температуры. Поскольку давление внутри пузырька гораздо ниже атмосферного, окружающая вода будет стремиться внутрь и сожмет пузырек. По мере того как объем пара внутри пузырька будет уменьшаться, плотность превысит плотность насыщенного пара и пар внутри пузырька начнет конденсироваться. Практически мгновенно пузырек лопнет.

Теперь предположим, что мы будем нагревать воду на плите. По мере увеличения температуры воды будут возрастать и плотность насыщенного пара, и давление. Вначале пузырьки насыщенного пара будут неустойчивыми; под воздействием атмосферного давления они будут быстро схлопываться. Но когда температура приблизится к 100 °С, произойдет нечто неожиданное: пузырьки насыщенного пара вдруг станут стабильными и вода начнет закипать (рис. 7.2.5). При этой температуре (температуре кипения воды) давление насыщенного пара внутри пузырька становится равным атмосферному и пузырьки воздуха могут существовать в воде. Что еще удивительнее, эти пузырьки растут за счет испарения; поверхность каждого пузырька является границей раздела между водой и паром. Получая тепло, вода может переходить в пар и увеличивать пузырек. Правда, образовавшиеся пузырьки быстро всплывают на поверхность и лопаются, но вместо них тут же образуются новые.

При кипении вода так быстро превращается в пар, что может поглотить почти любое количество поступающего в нее тепла. Вот почему так трудно нагреть воду выше температуры кипения. Открытая кастрюля с водой на плите нагревается до температуры кипения и остается при этой температуре, пока вся вода не превратится в пар. Только после этого температура кастрюли вновь начнет возрастать.

Постоянная, строго определенная температура кипения воды позволяет сварить овощи или яйцо в течение строго определенного времени.

## Изменение температуры кипения воды

Температура кипения воды зависит от давления окружающей среды. Для любой открытой посуды это давление равно атмосферному. Однако атмосферное давление с высотой уменьшается и до некоторой степени зависит от погоды. Вблизи уровня моря вода кипит при 100 °С, но на высоте 3000 м — уже только при 90 °С. Это снижение температуры кипения воды с ростом высоты над уровнем моря объясняет, почему многие кулинарные рецепты приходится адаптировать для использования на больших высотах. На уровне 3000 м яйцо будет дольше вариться, потому что кипящая вода, в которую оно погружено, имеет температуру 90 °С, а не 100 °С. Точно так же на больших высотах замедляется приготовление риса, бобов и многих других продуктов.

При достаточно низком давлении вода может закипеть даже при комнатной температуре. И наоборот, высокое давление может помешать воде закипеть, пока она не станет чрезвычайно горячей. Котлы паровых машин и электростанций часто работают при высоких давлениях, и температура кипения воды в них может превышать 300 °С.

Один из способов уменьшить время приготовления пищи — использовать скороварку, герметически закрытую кастрюлю, из которой не выходит пар, благодаря чему давление внутри кастрюли превышает атмосферное. Повышенное давле-



Рис. 7.2.5. Вода кипит при 100 °С, когда атмосферное давление уже не в состоянии раздавить пузырьки водяного пара.



**Рис. 7.2.6.** Вода в этой стеклянной мерной кружке была перегрета в микроволновой печи, затем ее помешали вилкой. В результате произошло взрывное кипение, вся вода за долю секунды выплеснулась из кружки.



**Рис. 7.2.7.** Напиток в стеклянном бокале перенасыщен углекислым газом ( $\text{CO}_2$ ). Газ постепенно улетучивается через соприкасающуюся с воздухом поверхность. Пузырьки  $\text{CO}_2$  поднимаются вверх со дна бокала, где они зарождаются в виде мельчайших пузырьков в центрах газообразования. Несмотря на микроскопический размер пузырьков-зародышей, они быстро растут по мере того, как все больше молекул  $\text{CO}_2$  проникает в них из газированного напитка. Каждый поток пузырьков исходит из своего центра газообразования. Таких центров немного, поэтому в бокале всего несколько потоков пузырьков.

ние не дает содержимому кипеть, пока температура не поднимется намного выше  $100\text{ }^\circ\text{C}$ . Если давление будет в два раза выше атмосферного давления на уровне моря, то вода закипит только при  $121\text{ }^\circ\text{C}$ . При такой температуре и яйца, и овощи, и другие продукты готовятся очень быстро.

Однако, хотя вода и может закипеть, это еще не означает, что она закипит. Начало кипения зависит от мельчайших пузырьков-зародышей, которые затем растут благодаря испарению. Без этих начальных пузырьков-зародышей вода не закипит. Поскольку центры парообразования (пузырьки-зародыши) почти никогда не возникают самопроизвольно при температуре ниже  $300\text{ }^\circ\text{C}$ , необходим какой-то другой источник возникновения этих зародышей. Чаще всего центрами парообразования становятся дефекты или неоднородности на стенках сосуда либо примеси жидкости. Эти центры обычно сорбируют (притягивают к себе) воздух или другие имеющиеся в воде газы и затем становятся питомником для пузырьков-зародышей пара. Зависимость парообразования от этих центров объясняет, почему пузырьки пара в кипящей воде (точно так же, как в газированной воде или в шампанском) часто потоком всплывают из определенных мест в сосуде.

Если вы равномерно нагреваете воду в чистом стеклянном сосуде, она может и не закипеть точно при температуре кипения. Стекло на атомном уровне почти такое же гладкое, как жидкость, поэтому не способствует образованию пузырьков-зародышей. Без надежных центров парообразования вода может прекратить формирование пузырьков-зародышей и приостановить кипение. Если кипение прекратилось, температура воды может подняться выше температуры кипения. Такая вода называется перегретой.

Перегретая вода легко и часто образуется в микроволновой печи. Она может быть очень опасна. Прикосновение вилкой, добавление сахара или соли, иногда просто встряхивание или открывание крышки контейнера может привести к бурному вскипанию или даже взрывному кипению (рис. 7.2.6). Чем выше температура по сравнению с температурой кипения, тем больше энергии может высвободиться при резком закипании. Будьте осторожны, когда греете воду в микроволновой печи, особенно в стеклянной или глазурированной посуде. Если очень горячая вода не кипит (хотя и должна бы), учтите, что она может быть перегрета. Безопаснее всего в этом случае не манипулировать с сосудом, пока вода немного не остынет.

Есть еще один интересный способ изменить температуру кипения воды — растворить в ней определенные вещества. Растворенные реагенты отвлекают на себя молекулы воды, при этом уменьшается вероятность того, что молекулы воды покинут воду и превратятся в пар или, в противоположном случае, в лед. Так как растворенные вещества препятствуют выходу молекул воды из жидкой фазы, они подавляют любые фазовые переходы, которые снижают количество жидкой водной фазы. Вот почему растворение сахара или соли в воде замедляет ее испарение и повышает температуру кипения. По этой же причине соленая вода замерзает при более низкой температуре, чем пресная, а соль способствует таянию льда. Песок же, наоборот, не способствует таянию, потому что не растворяется в воде.

Когда в воде растворено слишком много вещества, чтобы поддерживать фазовое равновесие, говорят, что она перенасыщена и должна подвергнуться фазовому разделению — какая-то часть вещества должна уйти из раствора и оставить воду насыщенной, но не перенасыщенной. Запустить это фазовое разделение иногда непросто, часто для этого требуется образование зародышей, как при кипении.

Например, газированный напиток, который вы только что налили в стакан, перенасыщен углекислым газом ( $\text{CO}_2$ ). В бутылке напиток находился в состоянии фазового равновесия с имеющим высокую плотность углекислым газом; равновесная концентрация молекул  $\text{CO}_2$  была огромной. При высвобождении плотного  $\text{CO}_2$  равновесие нарушается, напиток становится перенасыщенным. В стакане молекулы газа постепенно улетучиваются, и напиток становится однородным, не шипучим. Если на стекле или в толще напитка есть центры газообразования, формируются пузырьки-зародыши, и газ уходит также в виде всплывающих пузырьков (рис. 7.2.7). Предварительное встряхивание насыщает напиток пузырьками-зародышами, и когда вы откупориваете бутылку, начинается их взрывной рост.



## 7.3 Лампы накаливания

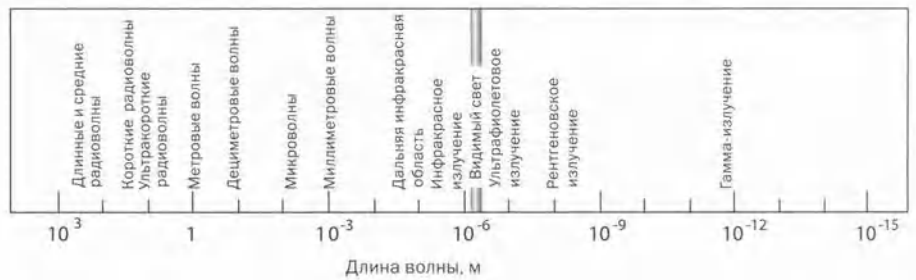
Уже более сотни лет лампы накаливания дают нам свет — достаточно щелкнуть выключателем. Изобретение электрической лампочки положило конец эпохе свечей и газовых фонарей, стимулировало развитие электроэнергетики. И хотя за эти годы появились самые разнообразные осветительные устройства — от инфракрасных ламп до галогенных автомобильных фар, все лампы накаливания имеют в своей основе одну очень простую вещь: нить или спираль, раскаленную до очень высокой температуры.

### Свет, температура и цвет

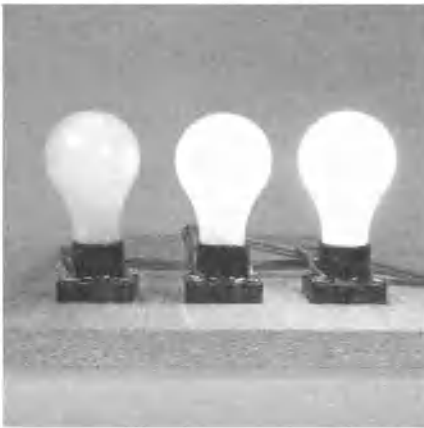
Свет от лампочки накаливания — это часть теплового излучения, испускаемого этой горячей нитью (спиралью). Большинство типов электромагнитных волн невидимы, наши глаза воспринимают только узкий диапазон волн, которые мы называем видимым светом. Любое тело, температура которого выше  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ , излучает достаточно видимого света для того, чтобы мы могли разглядеть его в темной комнате.

При более высоких температурах этот видимый свет становится ярче и меняет цвет от красного к оранжевому, потом к желтому и белому. При  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  свет тускло-красный, при  $1700\text{ }^{\circ}\text{C}$  становится оранжевым, как у свечи. А при  $5800\text{ }^{\circ}\text{C}$ , то есть при температуре Солнца, сверкающий белый свет напоминает солнечный.

Итак, чтобы воспроизвести чистый белый солнечный свет, нить лампы должна быть нагрета до  $5800\text{ }^{\circ}\text{C}$ . К сожалению, никакие вещества не остаются твердыми при такой высокой температуре. Даже металлический вольфрам, лучший из известных нам материалов для изготовления нитей накаливания, легко возгоняется (непосредственно переходит из твердого состояния в газообразное) при температурах выше  $2500\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Следовательно, лампам накаливания приходится работать при более низких температурах, и они не в состоянии имитировать свет Солнца. Большинство из них дает теплый желто-белый свет, характерный для металлического вольфрама, раскаленного до температуры около  $2500\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



**Рис. 7.3.2.** Спектр электромагнитного излучения. Длина волн представлена в виде логарифмической шкалы. Это означает, что длина волны слева направо уменьшается в 10 раз на каждом делении.



**Рис. 7.3.1.** По мере роста напряжения спираль в лампах накаливания все сильнее раскаляется и испускает все более яркий и близкий к белому свет. Более холодная нить (слева) дает тусклый красноватый свет, самая горячая (справа) — яркий желтовато-белый. Это матовые лампочки, поэтому спирали не видны.

И яркость, и цвет света нити зависят от ее температуры (**рис. 7.3.1**). Так как свет несет энергию, мы можем измерить его яркость в количестве ватт видимого света, которое он излучает. Но как охарактеризовать цвет света? Более того, что отличает видимый свет от других, невидимых разновидностей электромагнитного излучения? Хотя подробные ответы на эти вопросы мы получим в главах 13 и 14, уже сейчас можно сделать несколько важных наблюдений.

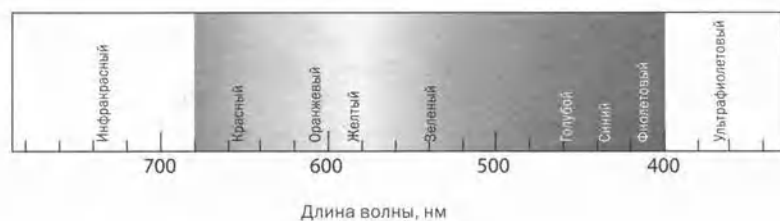
Видимый свет — это часть непрерывного спектра электромагнитного излучения, который простирается от радиоволн на одном конце до гамма-излучения на другом (**рис. 7.3.2**). Разновидности электромагнитного излучения различаются длиной волны, то есть расстоянием между вершинами волн. Что такое длина волны, легко понять где-нибудь на берегу озера или моря, где видны вершины волн и можно непосредственно измерить расстояние от одной до другой. Но несмотря на то, что вершины электромагнитных волн не так легко разглядеть, они существуют, и расстояние между ними тоже можно измерить.

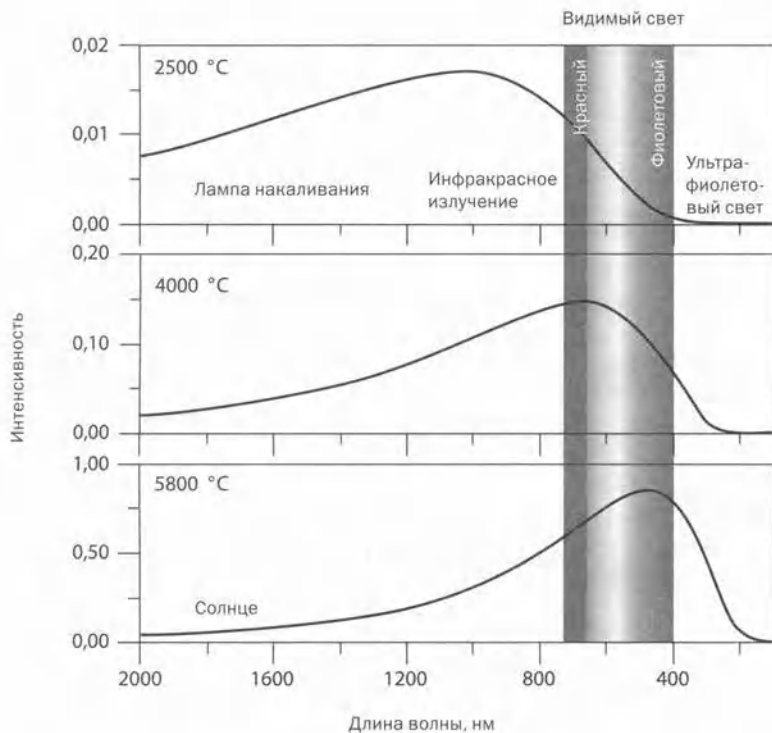
Электромагнитное излучение, испускаемое горячей нитью накаливания, в основном состоит из инфракрасного, видимого и ультрафиолетового света. Хотя видимый свет — лишь малая часть всего электромагнитного спектра, он особенно важен для нашей повседневной жизни. **Рис. 7.3.3** дает расширенное представление о видимой части электромагнитного спектра. Различные цвета, которые мы видим, соответствуют определенным диапазонам длин волн. Например, свет с длиной волны в 530 нм (нанометров, миллиардных долей метра) мы видим как зеленый.

Однако тепловое излучение, которое испускает нить накаливания — это не какая-то одна волна определенной длины: оно состоит из множества отдельных волн, которые охватывают некоторый участок спектра. Какие-то из этих волн красного цвета, другие зеленые, синие, а некоторые невидимы.

Распределение излучения по длинам волн зависит от температуры и свойств излучающей поверхности, в частности от ее излучательной способности — то есть способности излучать и поглощать свет. Излучательная способность характеризуется коэффициентом излучения, который измеряется по шкале от 0 до 1, где 1 — идеальная эффективность. Коэффициентом излучения, равным 1, обладает абсолютно черное тело; оно поглощает весь падающий на него свет и излучает тепло настолько интенсивно, насколько это вообще возможно. Хотя коэффициент излучения вольфрама составляет всего 0,43, вольфрамовая нить накаливания намотана таким образом, что образуется много темных участков и щелей. Благодаря этому нить по свойствам приближается к черному телу, и ее коэффициент излучения близок к 1.

**Рис. 7.3.3.** Участок спектра электромагнитного излучения, относящийся к видимому свету. Длины волн указаны в нанометрах (нм).





**Рис. 7.3.4.** Спектр абсолютно черного тела при 2500 °С (вверху), 4000 °С (в середине) и 5800 °С (внизу). При 5800 °С интенсивность излучения гораздо выше, чем при 2500 °С (обратите внимание на различный масштаб оси интенсивности), кроме того, излучение содержит гораздо большую часть видимого света.

Распределение длин волн, испускаемых абсолютно черным телом, определяется только его температурой и называется спектром абсолютно черного тела. Как видно из примеров на **рис. 7.3.4**, излучение абсолютно черного тела с ростом температуры становится ярче и его спектр смещается в сторону коротких волн. Тепловое излучение тела, которое не является черным, несколько слабее, но это излучение тоже становится ярче и сдвигается в сторону более коротких длин волн по мере возрастания температуры.

Наши глаза производят приблизительную оценку распределения длин волн, испускаемых черным телом, и мы наблюдаем красные, оранжевые, желтые, белые или синие оттенки света, в зависимости от температуры тела (таблица 7.3.1). Температура, связанная с определенным распределением длин волн, называется цветовой температурой, характерной для данного света.

**Таблица 7.3.1.** Цвет и температура некоторых источников света

Источник света	Температура	Цвет
Тепловая (инфракрасная) лампа	500 °С	Тускло-красный
Пламя свечи	1700 °С	Туманно-оранжевый
Нить лампы накаливания	2500 °С	Яркий желтовато-белый
Поверхность Солнца	5800 °С	Ярко-белый
Голубая звезда	6000 °С	Ослепительный сине-белый

Мы уже видим два главных недостатка лампы накаливания: низкая эффективность преобразования электрической энергии в видимый свет и низкая цветовая температура. При 2500 °С лишь около 12% теплового излучения приходится на видимый свет, остальное — это невидимые инфракрасные волны. Температура нити накаливания должна достичь 5000 °С, чтобы доля инфракрасного излучения упала ниже 50%. Кроме того, при цветовой температуре 2500 °С лампа дает желтоватый (по сравнению с солнечным) свет, потому что нить излучает недостаточное количество синего света. Большая часть усилий в развитии освещения за последние полвека была направлена на повышение энергоэффективности и цветовой температуры.



**Рис. 7.3.5.** Вольфрамовая нить современных ламп накаливания представляет собой двойную спираль, то есть пружину, скрученную, в свою очередь, из пружины меньшего диаметра, свитой из чрезвычайно тонкой вольфрамовой проволоки. Благодаря этому проволока большой длины занимает очень мало места.

❶ Льюису Говарду Латимеру (афроамериканский ученый и изобретатель, 1848–1928) было всего восемь лет, когда решение Верховного суда США, узаконившего рабство, поставило его отца, беглого раба, вне закона и заставило скрываться. Оставшийся с матерью Латимер прекрасно учился и стал квалифицированным инженером-конструктором. Поступив на работу к Хираму Максиму, конкуренту Эдисона, Латимер скоро стал специалистом по изготовлению углеродных нитей для ламп накаливания. Когда позже Латимер присоединился к команде изобретателей Эдисона, так называемым «Пионерам Эдисона», его надежная углеродная нить вскоре пришла на смену недолговечным нитям Эдисона из обугленного бамбука. Эта инновация сыграла ключевую роль в коммерческом успехе ламп Эдисона.

Нить накаливания лампы нагревается электрическим током, который передает ей определенную тепловую мощность (она указана в маркировке на лампе). Например, спираль 60-ваттной лампы из 60 Вт потребляемой электроэнергии производит 60 Вт тепловой мощности. Хотя сначала нить накапливает тепловую энергию, но затем ее температура быстро поднимается до такого уровня, что излучение тепловой энергии происходит сразу же, как только электрическая энергия преобразуется в тепловую. Поэтому 60-ваттная лампа отправляет 60 Вт тепловой энергии в окружающую среду в виде тепла, большую часть которого составляет тепловое излучение.

Температуру, при которой устанавливается этот тепловой баланс, как ни удивительно, можно определить совершенно точно. Причина в том, что тепловое излучение нити с ростом температуры увеличивается так быстро, что даже небольшое превышение температуры по сравнению с ее нормальным рабочим значением приводит к тому, что нить излучает больше тепловой энергии, чем производит ее из электроэнергии, и быстро охлаждается до нормального уровня. Как и для любого нагретого тела, мощность излучения нити пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры. Точная связь между излучаемой мощностью и температурой описывается уравнением:

$$\text{мощность излучения} = \text{коэффициент излучения} \times \text{постоянная Стефана — Больцмана} \times \text{температура}^4 \times \text{площадь поверхности} \quad (7.3.1)$$

Это соотношение называется законом Стефана — Больцмана, а входящая в него постоянная Стефана — Больцмана равна  $5,67 \times 10^{-8}$  Дж/(с·м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) или Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>). Учтите, что температура здесь выражается в градусах Кельвина.

Таким образом, увеличение температуры нити приводит к увеличению как цветовой температуры, так и яркости. Каждая из этих характеристик важна, поэтому хорошо, что их можно настраивать независимо друг от друга. Обычно мы предпочитаем более высокую цветовую температуру — если только не устраиваем романтический ужин, для которого идеально подходят свечи с красноватым пламенем. Более высокая цветовая температура у ламп накаливания обычно означает более горячую нить. Но и остановившись на какой-то температуре нити, можно увеличить яркость путем увеличения площади испускающей поверхности.

Несмотря на то, что идея лампы накаливания достаточно проста, найти материал, который может выдерживать крайне высокие температуры, оказалось не так легко. Первые нити делали из углерода и платины, при этом углерод казался наиболее перспективным материалом. В 1879 году Томас Эдисон разработал лампу накаливания с нитью из углеродного волокна, которая могла непрерывно светить в течение нескольких сотен часов. Это была не первая лампа накаливания, но первая имевшая практическое применение (более подробно о развитии ламп с углеродными нитями см. ❶).

Несмотря на то, что из всех элементов углерод имеет самую высокую температуру плавления (3550 °С), он относительно легко испаряется даже при гораздо более низких температурах. Поэтому углеродная нить при нагреве до температуры, близкой к температуре плавления, быстро улетучивается в виде газа. Когда в нити появляется разрыв (нить «перегорает»), прохождение тока прекращается. Кроме того, углерод легко воспламеняется, поэтому он должен быть заключен в герметичную стеклянную колбу, внутри которой либо инертный газ, либо вакуум.

Гораздо более подходящим материалом, который теперь используется практически во всех лампах накаливания, является вольфрам. Вольфрам плавится при 3410 °С, а при более низких температурах почти не улетучивается. Поэтому вольфрамовые нити могут работать даже при более высоких температурах, чем углеродные, производя при этом более насыщенный и близкий к белому свет. Правда, как и углерод, раскаленный вольфрам в воздухе сгорает, поэтому вольфрамовая нить также должна быть защищена стеклянной колбой.

Чтобы большая часть электрической энергии, проходящей через нить накаливания, превращалась в тепловую, нити должны быть длинными и тонкими. Нить типичной 60-ваттной лампочки сделана примерно из 0,5 м вольфрамовой



проволоки толщиной 25 микрон, скрученной в спираль длиной около 2 см. Чтобы полуметровая и очень тонкая вольфрамовая нить поместилась в колбу лампы, ее сворачивают в двойную спираль: вначале наматывают на маленькую катушку диаметром около 0,25 мм, а потом получившуюся пружину наматывают на другую катушку (рис. 7.3.5). Изготовление такой вольфрамовой нити — настолько сложный технологический процесс, что впервые эту задачу смогли решить только в 1937 году.

## Стеклоянная колба

Чтобы предупредить перегорание раскаленной спирали, ее заключают в стеклянную колбу, которую заполняют инертным газом. Этот газ (обычно азот и аргон) замедляет сублимацию, направляя некоторые из испарившихся атомов вольфрама обратно на нить. Газ продлевает срок службы нити, но имеет как минимум два недостатка. Во-первых, теплопроводность и конвекция уносят от нити часть тепла (см. 2). Во-вторых, крошечные частицы вольфрама, которые все-таки попадают в газ, конвекционным потоком переносятся на стекло и образуют темное пятно в верхней части лампы.

У стеклянной колбы есть и еще одна проблема: нить спирали надо каким-то образом провести внутрь через стекло. Это совсем не просто, потому что место контакта стекла и металла должно быть идеально герметизировано, а при увеличении температуры вещества расширяются. Если стекло и металл не будут одинаково расширяться при нагреве лампы, то она может разгерметизироваться или даже лопнуть.

Температурное расширение материалов вызывается атомными колебаниями. Благодаря тепловой энергии соседние атомы колеблются относительно равновесного расстояния между ними (рис. 7.3.6). Эти колебания асимметричны; сила отталкивания, возникающая, когда атомы слишком близко друг к другу, превышает силу притяжения, которую атомы испытывают, когда слишком удаляются друг от друга. В результате этой асимметрии они отталкиваются друг от друга с большей силой, чем сближаются. Поэтому атомы проводят большую часть своего времени на расстоянии, превышающем равновесное. Поскольку расстояние между ними в среднем больше равновесного, тело, состоящее из этих атомов, становится больше, чем оно было до получения дополнительной тепловой энергии.

По мере роста температуры атомы все больше удаляются друг от друга и размеры тела увеличиваются по всем направлениям. Степень расширения вещества при увеличении температуры обычно описывается коэффициентом объемного теплового расширения: это относительное изменение объема тела на один градус повышения температуры. Относительное изменение объема равно суммарному изменению объема, деленному на общий объем. Так как большинство материалов лишь незначительно расширяется при увеличении температуры на 1 °C (или 1 K), коэффициенты объемного расширения, как правило, невелики: около  $10^{-5} \text{ K}^{-1}$  для металлов, около  $10^{-6} \text{ K}^{-1}$  для специального стекла с низким коэффициентом теплового расширения и порядка  $10^{-4} \text{ K}^{-1}$  для жидкостей. Металлическую проволоку и сорт стекла для ламп тщательно подбирают таким образом, чтобы у них были близкие коэффициенты объемного расширения. Когда лампа нагревается, металл и стекло расширяются в равной степени и герметичность не нарушается.

## Долговечные, галогенные и двухнитевые лампы

Один из способов продлить жизнь спирали — увеличить площадь ее поверхности при том же напряжении тока. Имея большую поверхность излучения, нить будет меньше нагреваться и не так быстро изнашиваться. В результате получается долговечная лампа. К сожалению, долговечные лампы по сравнению с обычными менее энергоэффективны и дают свет красноватого оттенка. У долговечных ламп видимый свет составляет меньшую часть испускаемого излучения, поэтому, чтобы дать эквивалентное освещение, они потребляют более высокую мощность. В результате такие лампы не всегда выгодны: деньги, которые вы сэкономите, заменив лампы на долговечные, могут уйти на оплату увеличившихся счетов за электричество. Выбирая лампы, стоит учесть, сколько люменов (единиц измерения светового потока) они производят на один ватт потребляемой электроэнергии (рис. 7.3.7).

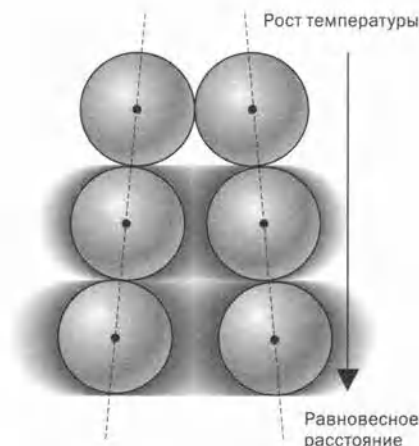


Рис. 7.3.6. При повышении температуры тепловая кинетическая энергия твердого тела возрастает, заставляя атомы более интенсивно колебаться относительно друг друга. При колебаниях атомы отталкиваются сильнее, чем притягиваются, поэтому среднее расстояние между ними слегка возрастает.

2 В большинство ламп накаливания закачивают недорогие аргон или азот, однако некоторые специальные лампы наполнены криптоном. У криптона чрезвычайно низкая теплопроводность, и криптоновые лампы передают меньше тепла от нити к стеклянной оболочке. Поэтому они более энергоэффективны, хотя и дороже, чем обычные лампы накаливания. Криптон — редкий инертный газ, его содержание в атмосфере составляет примерно одну частьцу на миллион. Криптоновые лампы используются там, где энергетическая эффективность, а значит, и срок службы питающей батареи критически важны.



Рис. 7.3.7. Различные 100-ваттные лампы обеспечивают различную освещенность в соответствии с указанным на упаковке количеством люменов.



Рис. 7.3.8. Такие галогенные лампы работают при более высоких температурах, чем обычные. Их свет ближе к белому. Большая стеклянная оболочка верхней лампы защищает маленькую лампу внутри.

Гораздо разумнее купить галогенную лампу — она не только более долговечна, но и более энергоэффективна, чем обычная. В галогенных лампах для постоянного восстановления нити накаливания во время работы остроумно используется химический трюк, который заключается в том, что нить заключена в тугоплавкую трубку из кварца или алюмосиликатного стекла, способную выдерживать воздействие химически активных веществ (рис. 7.3.8). Трубка содержит молекулы галогенов — брома и/или йода. Когда лампа горит, трубка сильно разогревается и галогены вступают в реакцию с каждым атомом вольфрама, появляющимся на ее внутренней поверхности. Образуется газ из молекулы вольфрама-галоген, которые дрейфуют по трубке, пока не наткнутся на раскаленную нить. Тут молекулы распадаются, и атомы вольфрама снова прилипают к нити.

Галоген обеспечивает вторичное использование вольфрама, возвращая на спираль испарившиеся с нее атомы металла. Правда, этот процесс постепенно меняет структуру нити. “Возвращенные” атомы вольфрама неравномерно распределяются по поверхности спирали, поэтому на ней постепенно образуются неровности, и в конце концов нить перегорает. Тем не менее такие нити могут работать более 2000 часов, даже если температура на несколько сотен градусов выше, чем в обычных лампах. Благодаря более высокой температуре свет галогенных ламп более белый, и при этом они гораздо более энергоэффективны, чем обычные.

Но и у галогенных ламп есть недостатки. Маленькая, сильно раскаленная, наполненная ядовитыми газами кварцевая трубка весьма пожароопасна, поэтому ее часто защищают еще одной внешней стеклянной трубкой. Кварцевая трубка чувствительна к следам пальцев — пятнам жира, которые изменяют ее цвет и могут привести к повреждениям, когда трубка нагреется. Наконец, система рециркуляции вольфрама работает только при высоких температурах. Когда галогенная лампа работает в режиме неполной (меньше 50%) нагрузки, вольфрам может осажаться не на нити, а на кварцевой трубке, затемняя лампу и укорачивая срок ее службы. Чтобы очистить кварцевую трубку и вернуть вольфрам на спираль, лампу нужно периодически включать при полной нагрузке\*.

Лампы различной мощности отличаются одна от другой площадью поверхности спирали. Площадь поверхности нити 100-ваттной лампы в четыре раза больше площади спирали 25-ваттной и, следовательно, излучает в четыре раза больше света. Чтобы обеспечить это четырехкратное увеличение тепловой энергии, 100-ваттная нить потребляет в четыре раза больше электроэнергии. При этом обе нити работают при одной и той же температуре и испускают свет одной и той же цветовой температуры.

Один из способов сделать лампу накаливания с разной светоотдачей — поместить в нее несколько независимых нитей. Нити двухнитевой лампы (рис. 7.3.9 и 7.3.10) можно включать и выключать по отдельности и вместе. В лампах мощностью 50–100–150 Вт одна нить потребляет 50 Вт электроэнергии, вторая — 100 Вт. Когда включена только более слабая из нитей, лампа светит с яркостью 50-ваттной. Когда горит более мощная нить — то как 100-ваттная. Но когда включены обе нити, яркость света такая, как у лампы мощностью 150 Вт. Поскольку одна из нитей всегда перегорает раньше другой, лампа рано или поздно переходит от трех уровней освещенности только на один.

\* Речь идет об использовании диммера — регулятора яркости лампы. Это устройство позволяет экономить электроэнергию за счет уменьшения яркости свечения. Если используется диммер, то для очистки лампы время от времени надо действительно выставлять режим полной яркости. Если диммер не используется, то проблемы очистки лампы нет.

## Тостеры и обогреватели

Если бы нити лампы накаливания предстояло раскаляться лишь докрасна, не было бы никакой необходимости делать ее из дорогостоящего вольфрама. Вместо этого ее вполне можно было бы изготовить из нихрома — недорогого сплава хрома и никеля. Несмотря на то, что при нагревании до высоких температур нихром плавится, при более низких температурах этот сплав имеет важное преимущество перед вольфрамом: он не горит в воздушной среде. Пусть нихромовые нити не годятся для осветительных ламп, зато они очень хороши для ламп тепловых, испускающих красное и инфракрасное излучение. В самом деле, нихром прекрасно подходит для всех видов электрических нагревательных элементов!

Нихромовые спирали и другие нагревательные элементы постоянно используются в нашей бытовой технике: в тостерах, обогревателях, бойлерах, утюгах, а также в электрических плитах и духовках. Вы даже можете увидеть эти нихромовые спирали в некоторых устройствах (например, в тостере), а в других приборах нихромовые спирали, как правило, спрятаны в электроизоляционные трубки, так что получаются прочные и надежные электронагревательные элементы.

С тостера мы и начнем, поскольку в этом приборе мы можем увидеть в деле раскаленную докрасна нихромовую спираль. Это спираль относительно большого размера, потому что она работает при более низких температурах и излучает гораздо меньше тепловой энергии на единицу площади поверхности, чем обычные нити ламп накаливания. Пока ломтик хлеба не коснулся спирали, она передает ему тепло только за счет конвекции и излучения. В большинстве случаев хлеб помещается около или ниже спирали, поэтому естественная конвекция недостаточно эффективна. Таким образом, ломтик нагревается в основном за счет излучения — оно обеспечивает высокую температуру поверхности, необходимую для образования поджаристой корочки. В принципе, вы можете поджарить тост и в духовке-гриль, поскольку там тоже действует излучение, однако запеченный в духовке тост обычно не имеет такого приятного цвета, да и на вкус не так хорош, как хлеб из тостера.

Если вывернуть тостер наизнанку, мы получим обогреватель. Конечно, настоящий обогреватель обычно имеет еще и вентилятор для принудительной циркуляции нагретого воздуха или заполненный жидкостью и рассеивающий тепло радиатор, но все равно обогреватель — близкий родственник тостера. В обогревателях для преобразования электрической энергии в тепловую также используется нихромовая спираль. Затем эта тепловая энергия распространяется по комнате.

От обогревателей с открытой спиралью идут потоки тепла, которые вы можете ощущать кожей. Даже в холодной комнате такое тепловое излучение может помочь вам согреться и чувствовать себя комфортно.

В обогревателях других типов спираль спрятана, чтобы уменьшить теплоотдачу посредством излучения, использовав вместо этого принудительную конвекцию. В таких устройствах вентилятор дует теплый воздух в комнату. Точно так же устроены фены для сушки волос, разница только в том, что они направляют поток воздуха не в пространство комнаты, а на волосы. Внутри фена обычно тоже можно разглядеть нихромовую спираль, но она никогда не раскаляется настолько, чтобы излучать видимый свет. Зато спирали в промышленных пистолетах для сушки струей горячего воздуха раскаляются докрасна — и не вздумайте использовать эти приборы для того, чтобы высушить волосы!

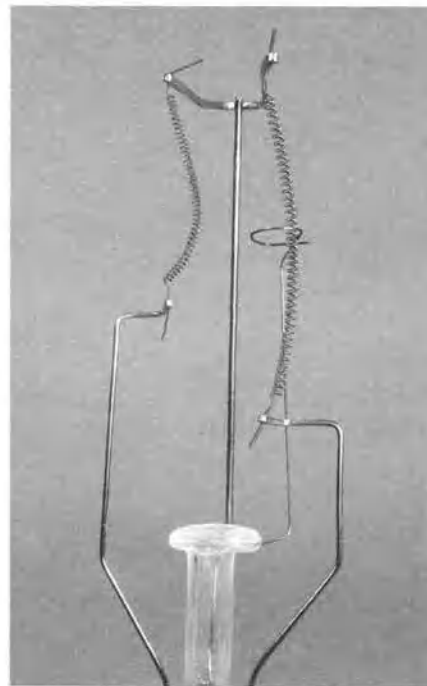
Наконец, существуют обогреватели, в которых тепло от нихромового элемента передается жидкости, циркулирующей внутри радиатора. Под действием естественной конвекции эта жидкость равномерно и одновременно нагревает весь радиатор. Затем обширная горячая поверхность радиатора отдает тепло в комнату путем конвекции и излучения. При этом радиатор теплый, но не обжигающе горячий, поэтому его можно безопасно использовать там, где есть дети. Даже если ребенок дотронется до радиатора, он не обожжется, а возможность того, что с помощью радиатора дети устроят пожар, исключена.

## Водонагреватели и лавовые лампы

Электрический водонагреватель (бойлер) основан на том же принципе, что и радиаторный обогреватель. Вода в большом баке нагревается погруженными в нее



**Рис. 7.3.9.** В двухнитевой лампе используются две независимые спирали. Левая спираль короче и тоньше правой, поэтому дает примерно в два раза меньше света. Три разных световых режима соответствуют включенной левой, включенной правой и обеим включенным спиралям.



**Рис. 7.3.10.** Двухнитевая лампа без стеклянной колбы. Мощность более короткой и тонкой спирали (слева) 50 Вт, более длинной и толстой (справа) — 100 Вт.



**Рис. 7.3.11.** В этой лавовой лампе воск плавится, когда его снизу подогревает обычная лампа накаливания. Плотность расплавленного воска низкая, поэтому он всплывает вверх через слой другой жидкости. Там воск остывает и начинает отвердевать. При этом его плотность возрастает, так что он снова опускается на дно. Воск снова и снова повторяет этот путь.

электрическими элементами. Поскольку благодаря конвекции нагретая вода поднимается, вся вода около или над нагревательными элементами прогревается одновременно до нужной температуры. При достижении заданной температуры термостат выключает нагревательный элемент. Горячая вода выходит через трубу в верхней части бака, холодная вода подается в нижнюю часть. Так как горячая вода поднимается вверх и не смешивается с холодной, поступающая холодная вода остается внизу, и вы можете продолжать забирать горячую воду из верхней части бака, пока он весь не заполнится холодной.

Но как только уровень холодной воды поднимается выше нагревательного элемента, термостат улавливает падение температуры и вновь включает нагрев. Если только вы не расходуете горячую воду чересчур активно, водонагреватель успевает заменять ее свежей порцией, и вы никогда не останетесь без горячей воды. Но если ее запас иссякнет, системе понадобится некоторое время на восстановление. Это связано с тем, что происходит одновременный нагрев всей находящейся над элементом воды — образующаяся конвективная ячейка проходит весь путь от нагревательного элемента до верхней части бака.

Чтобы ускорить процесс восстановления, во многих бойлерах предусмотрено два нагревательных элемента: один в нижней части бака и один в средней. Одновременное включение обоих элементов может вызвать перегрузку электрической сети, поэтому они включаются только поочередно.

Когда очередная порция горячей воды кончается, включается верхний элемент и быстро нагревает воду от середины до верха бака. Раз нужно нагреть вдвое меньше воды, это происходит вдвое быстрее.

Когда вода в верхней части бака становится горячей, верхний элемент отключается и включается нижний. Образуется новая конвективная ячейка, которая поднимается со дна до уровня горячей воды. Теперь нагревается только вода в нижней части бака. Если расходовать горячую воду не слишком быстро, дальше будет работать только нижний элемент.

Но поскольку нижний элемент обычно выполняет львиную долю работы, то он, как правило, первым и выходит из строя. Когда это происходит, нужно отключить бойлер, слить воду, заменить элемент, снова наполнить бак водой и снова включить.

Если вы случайно включите бойлер до того, как он заполнится водой, нагревательный элемент не будет покрыт водой, которой он должен передать тепловую энергию. В результате элемент может перегреться и расплавиться в считанные секунды.

Лавовые (гелевые) лампы — это очаровательные игрушки, стеклянные сосуды, в которых тепло от лампы накаливания заставляет шарики размягченного воска всплывать в какой-то другой жидкости. Охладившись, шарик опускается и затем вновь повторяет тот же путь (**рис. 7.3.11**). Принцип действия конвективной ячейки, которая несет воск вверх и вниз, было бы легко понять, если бы не две несмешивающиеся жидкости, которые, как кажется наблюдателю, циркулируют в противоположных направлениях: нагретый воск поднимается сквозь какую-то другую жидкость, а остывший опускается сквозь нее же.

Дело в том, что лампа, расположенная в нижней части сосуда, разогревает воск почти до температуры плавления; он действительно ведет себя похоже на жидкость. Охлаждаясь же в верхней части сосуда, воск по свойствам вновь приближается к твердому веществу. Как и у большинства материалов, плотность воска в твердом состоянии значительно выше, чем в жидком. Когда лампочка нагревает воск, он становится более жидким. Полужидкий воск всплывает в жидкости, наполняющей сосуд, в верхнюю часть лампы. Но там он остывает и начинает отвердевать. Твердый или затвердевающий с относительно высокой плотностью снова тонет в жидкости-наполнителе и опускается на дно сосуда. Этот цикл повторяется снова и снова.



## 7.4 Одежда и теплоизоляция

Когда в холодный зимний день вы сидите у камина, ваша кожа приятно нагревается от тепла раскаленных углей. Но когда вы бредете по снегу в магазин, то последнее, чего вам хотелось бы, — это утечка тепла. Будучи самым теплым объектом в ближайших окрестностях вашего тела, вы можете стать холоднее, но не можете стать теплее. Поэтому вы делаете все возможное, чтобы избежать утечки тепла, и поплотнее закутываетесь в свое новое длинное пальто: его теплоизоляционные свойства не дадут вам замерзнуть среди льда и сугробов. В этом разделе мы рассмотрим теплоизоляцию и то, как она препятствует передаче тепла от одного тела к другому.

### Почему важно сохранять температуру тела

Теплоизоляция замедляет передачу тепла между телами. Именно она сохраняет ваш дом теплым, холодильник — холодным и не дает вам обжечь пальцы, когда вы берете в руки чашку горячего кофе. Один из наиболее важных примеров — теплоизоляция одежды. Главная неэстетическая цель одежды — регулировать скорость, с которой тепло входит и выходит из вашего тела. Одежда помогает поддерживать необходимую температуру тела.

Поддержание температуры тела путем саморегуляции (гомеостаза) — уникальное свойство млекопитающих и птиц. Холоднокровные животные — практически все рептилии, амфибии и рыбы — не в состоянии регулировать температуру тела. Вместо этого они способны свободно обмениваться теплом с окружающей средой и, как правило, находятся с ней в состоянии теплового равновесия.

Как ни печально, жизненно важные химические процессы очень чувствительны к температуре. Причина этого отчасти в том, что тепловая энергия играет важнейшую роль в инициации химических реакций; она дает энергию активации, необходимую для осуществления многих из этих реакций. По мере того как температура холоднокровных животных понижается, на каждую молекулу приходится все меньше тепловой энергии и химические реакции происходят реже. Обмен веществ животного замедляется, и оно становится вялым, заторможенным и более уязвимым для хищников.

Теплокровные животные, наоборот, обладают системой терморегуляции, которая позволяет им поддерживать постоянную оптимальную температуру тела. Независимо от окружающей среды млекопитающие или птицы поддерживают внутри своего тела определенную температуру, позволяющую им одинаково активно функционировать и зимой, и летом. Преимущества постоянной температуры огромны. В холодный день теплокровный хищник легко ловит и пожирает свою заторможенную холоднокровную добычу.

Но за теплокровность нужно платить. Тепловую энергию, необходимую для поддержания температуры тела животного, нужно откуда-то брать, и животное сражается за эту энергию с окружающей средой. Мы не осознаем этого, но многое в нашем поведении определяется необходимостью поддерживать температуру тела. Наш организм очень внимательно относится к тому, сколько тепловой энергии он производит, и очень тщательно контролирует теплообмен с окружающей средой.

В состоянии покоя организм человека превращает химическую потенциальную энергию в тепловую со скоростью примерно 80 килокалорий в час. Даже отдыхая и не производя никакой работы, наше тело потребляет столько энергии! В самом деле: сердце продолжает перекачивать кровь, синтезируются и используются для строительства новых клеток различные нужные вещества, и кроме того — мы непрерывно продолжаем думать. Так как химическая энергия не расходуется на внешнюю работу или на создание большого количества потенциальной энергии, основная ее часть переходит в тепловую энергию.

Восемьдесят килокалорий примерно эквивалентны 100 Вт, то есть в состоянии покоя человек использует примерно столько же энергии, сколько 100-ваттная лампочка. И, как и в случае с лампочкой, большая часть этой энергии переходит в тепловую. Когда человек более активен, он или она производит больше тепловой энергии. Эта постоянная выработка тепловой энергии — объяснение того, почему в переполненной людьми комнате становится тепло. Может показаться, что 100 Вт — не слишком большая мощность, но когда сто человек находятся в ограниченном пространстве, они действуют как обогреватель мощностью 10 000 Вт, и тогда в помещении может стать чересчур жарко.

Если у вас нет возможности избавиться от тепловой энергии метаболизма, вы становитесь все горячее. Для поддержания постоянной температуры вы должны передавать тепло окружающей среде. Так как тепло естественным образом перетекает от более горячего тела к более холодному, для передачи тепла температура вашего тела должна быть выше, чем температура окружающей среды. Это одна из причин того, что температура тела человека составляет примерно 37 °С: эта температура выше, чем в большинстве мест на Земле, кроме самых жарких, так что тепло естественным образом переходит от вашего тела в окружающую среду.

Находящееся в покое тело генерирует тепловую энергию в общем и целом с постоянной скоростью, поэтому основной способ поддерживать нужную температуру — регулировать потерю тепла. Как и другие теплокровные животные, мы разработали целый ряд физиологических и поведенческих механизмов регулирования потерь тепла. Давайте рассмотрим эти методы в терминах механизмов передачи тепла: теплопроводности, конвекции и излучения.

## Сохраняем тепло: теплопроводность

В целом вы должны терять тепловую энергию с такой же скоростью, как ее производите: около 100 джоулей в секунду. Эта скромная скорость достигается относительно легко. За исключением жарких дней или очень интенсивной физической нагрузки, ваше тело должно прилагать усилия, чтобы избежать слишком быстрой потери тепла. Поскольку все три механизма теплоотдачи участвуют в этой потере тепла, вы должны контролировать их все для того, чтобы сохранять тепло и не замерзнуть.

Один из способов, с помощью которого ваш организм может сохранить тепло, — снизить теплопотери за счет теплопроводности. Некоторые материалы проводят тепло лучше, а другие хуже, и дело здесь в различной теплопроводности. Теплопроводность показывает, насколько быстро тепло проходит через вещество, на которое действует разница температур. Кожа имеет чрезвычайно низкую теплопроводность, из чего следует, что она проводит сравнительно мало тепла по сравнению с такими материалами, как стекло или медь.

Теплопроводность — это характеристика самого вещества, так что она определяется для небольшого кубика этого вещества с разницей температур в один градус на противоположных сторонах кубика. Человеческая кожа также имеет определенную теплопроводность. Но чтобы определить, сколько тепла будет проходить через вашу кожу, необходимо учитывать не только ее теплопроводность, но также размеры, форму и разницу температур. Чем больше поверхность вашей

кожи и чем больше большая разница температур, тем больше тепла будет проводить ваша кожа. При этом чем толще кожа, тем меньше разность температур по обе стороны каждого ее участка и тем меньше тепла она проводит.

Таким образом, количество тепла, проходящего через кожу, зависит от ее теплопроводности, толщины, площади поверхности и разности температур. Пытаясь свести к минимуму потери тепла, ваш организм контролирует все эти факторы:

- 1 использует в коже вещества с пониженной теплопроводностью;
- 2 делает кожу настолько толстой, насколько это позволяет практичность;
- 3 минимизирует площадь поверхности кожи;
- 4 минимизирует разницу температур по обе стороны кожи.

Кожа и лежащие под ней ткани содержат жир и другие изолирующие вещества. Теплопроводность жира составляет около 20% теплопроводности воды и лишь 0,03% теплопроводности меди. Организм так или иначе использует жир для хранения энергии, но размещая этот жир в коже и под ней, он заодно и повышает собственные теплозащитные способности. Более того, наличие жирового подкожного слоя увеличивает толщину кожи и тем самым уменьшает разницу температур на каждую единицу толщины. “Толстокожие” люди сохраняют тепло лучше, чем “тонкокожие”.

Минимизация площади поверхности означает, что наше тело относительно компактно — ближе по форме к шару, чем к листу бумаги. Множество механизмов адаптации привели в ходе эволюции к развитию рук, ног и пальцев, которые увеличивают общую площадь вашей поверхности. Тем не менее у нас относительно мало “лишней” поверхности, через которую можно терять тепло.

Наконец, организм пытается снизить теплопотери, уменьшая разность температур между кожей и окружающим воздухом. Это происходит благодаря тому, что температура кожи намного ниже температуры внутри тела, или его центральной температуры. В холодный день у вас мерзнут руки и ноги, потому что они холодные. Чем холоднее конечности, тем меньше тепла отдают они соприкасающемуся с ними холодному воздуху.

Разрешить рукам мерзнуть было бы простым решением, если бы не проблемы с кровообращением. По мере приближения к холодным пальцам вашей крови приходится остывать, а возвращаясь к теплоте сердца и другим внутренним органам — вновь нагреваться до их температуры. Такое регулирование температуры крови возможно благодаря механизму, который называется противоточным теплообменом. Когда теплая кровь течет по артериям в сторону холодных пальцев, она отдает тепло крови, которая возвращается от пальцев к сердцу по проходящим рядом венам (рис. 7.4.1). Кровь, идущая к пальцам, становится холоднее, а идущая к сердцу — теплее.

## Сохраняем тепло: конвекция

В холодный день тепло, которое теряет кожа, нагревает окружающий воздух. Количество тепла, необходимое для нагревания этого воздуха, зависит от его количества и удельной теплоемкости (см. с. 221), а также от того, на сколько градусов должна повыситься температура воздуха, чтобы сравняться с температурой тела. Но поскольку воздух — очень плохой проводник тепла, ваша кожа способна нагреть только очень тонкий, непосредственно прилегающий к ней слой воздуха. Если бы этот слой оставался неподвижным, достаточно было бы согреть его один раз, и все было бы в порядке. Защищенная слоем теплого воздуха кожа больше не отдавала бы тепла, разность температур уменьшилась бы до нуля, и вам было бы тепло и хорошо.

Но беда в том, что воздух чрезвычайно подвижен. Всякий раз, когда коже удается согреть прилегающий воздух, конвекция уносит его и заменяет холодным. Из-за этого температурная разница остается высокой, и тепло быстро уходит через кожу. Вы мерзнете. Ветер усугубляет потерю тепла, потому что уносит от вас теплый воздух еще быстрее, чем естественная конвекция. Подобно тому, как в духовках с принудительной конвекцией еда готовится быстрее, люди быстрее замерзают в морозильнике с принудительной конвекцией (то есть в холодный ветреный день). Более

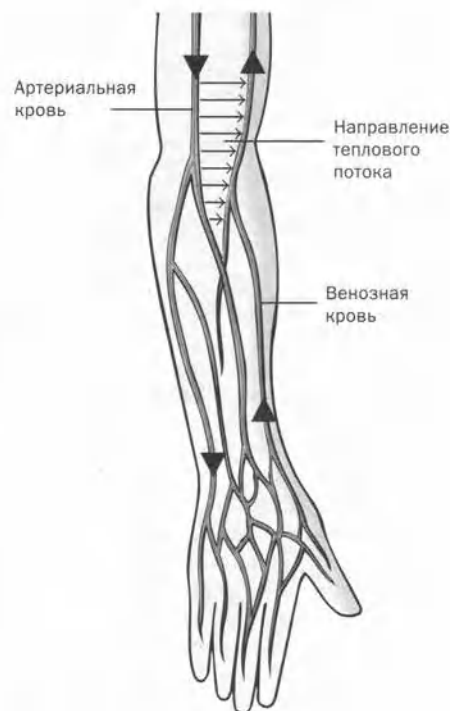


Рис. 7.4.1. Кровь, которая течет по артериям в сторону ладони, обменивается теплом с кровью, текущей в сторону сердца по венам. Таким способом кровь может доставлять к пальцам кислород и питательные вещества и при этом не нагревать их до центральной температуры тела. Этот адаптационный механизм позволяет уменьшить потерю тепла в холодную погоду.



**Рис. 7.4.2.** Конвекция происходит, только если более горячий объект расположен рядом или ниже более холодного, чтобы теплый поток мог подниматься вверх. Если нагревать верхнюю часть наполненной водой пробирки, горячая вода будет оставаться сверху, а холодная — внизу. Так как вода — плохой проводник тепла, вода в верхней части пробирки может даже закипеть, в то время как вода в нижней останется настолько холодной, что пробирку можно держать в руке.

интенсивная потеря тепла из-за движущегося воздуха называется переохлаждением под действием ветра — в ветреный день вы сильнее чувствуете холод.

Чтобы противостоять конвективным теплопотерям и переохлаждению под действием ветра, теплокровные животные покрыты шерстью или пухом. Шерсть и сама по себе плохой проводник тепла, но ее главная задача — создать преграду потоку воздуха. Проходящий через шерсть воздух испытывает большое сопротивление, которое замедляет его движение. В густой шерсти овец воздух задерживается и уже почти не движется. Так как для конвекции требуется воздушный поток, овцы могут терять тепло только теплопроводностью через шерсть и воздух. Но так как оба они — очень плохие проводники тепла, овцы сохраняют тепло и не мерзнут.

У людей относительно мало волос на теле, поэтому мы плохо приспособлены к морозу и ветру. Отсутствие естественной теплоизоляции является одной из причин того, почему мы носим одежду. Подобно шерсти или перьям, наша одежда задерживает воздух и уменьшает конвекцию.

Тонкие волокна и нити лучше всего могут задерживать воздушный поток. Неудивительно, что лучшую одежду с высокой степенью тепловой защиты делают из шерсти (натуральной или синтетической) и пуха (также натурального или синтетического). Так как неподвижный воздух имеет более низкую теплопроводность, чем удерживающие его ворсинки шерсти или пуха, идеальная куртка использует ровно столько материала, сколько нужно, чтобы создать достаточно толстую неподвижную воздушную прослойку.

Эти же соображения можно применить к плаванию в холодной воде. Если слой воды вокруг вас неподвижен, то вы скоро согреетесь. Поэтому некоторые пловцы и ныряльщики надевают «мокрые» гидрокостюмы. Губчатый (пористый) материал такого гидрокостюма пропускает внутрь некоторое количество воды и неподвижно удерживает слой этой воды у кожи пловца. Пока слой неподвижен, вода остается неплохим изолятором тепла. Это иллюстрирует **рис. 7.4.2**, где показано, как нагревание верхней части пробирки с водой препятствует конвекции.

## Сохраняем тепло: излучение

Терять тепло можно и посредством излучения. Наша кожа испускает тепловое излучение в окружающее пространство, а оно, в свою очередь, испускает тепло в нашу сторону. Количество передаваемого излучением тепла зависит от температуры излучающей поверхности и ее излучательной способности, то есть от того, насколько хорошо она поглощает и испускает свет. Как мы уже говорили, обсуждая закон Стефана — Больцмана (с. 238), количество тепла, испускаемого поверхностью, приблизительно пропорционально величине температуры в четвертой степени (по абсолютной шкале). Таким образом, горячее тело излучает гораздо больше тепла, чем холодное.

Как всегда и везде, тепло переходит от более горячего тела к более холодному. Однако если передача тепла посредством теплопроводности и конвекции пропорциональна разности температур, то излучение передает тепло пропорционально разности четвертых степеней температур! Вот почему передача тепла излучением к вашей коже или от нее особенно заметна, когда вы подвергаетесь воздействию очень холодного или очень горячего объекта.

Солнце так быстро согревает вашу кожу, поскольку испускает больше тепла, чем все другие объекты окружающей среды вместе взятые. Выраженная в градусах шкалы Кельвина температура солнечной поверхности (6000 K) примерно в двадцать раз больше температуры вашей кожи (310 K). Несмотря на то, что Солнце так далеко и кажется таким маленьким, оно испускает в вашу сторону примерно в  $20^4$  или в 160 000 раз больше тепла с единицы площади поверхности, чем вы в его сторону.

И наоборот, темное ночное небо быстро вас охлаждает, потому что имеет чрезвычайно низкую температуру. Температура безвоздушного пространства за пределами земной атмосферы всего на несколько градусов выше абсолютного нуля\*. Если вы стоите на открытом месте в ясную темную ночь, то вы излучаете в пространство примерно сто ватт тепловой энергии, в то время как получаете от него гораздо меньше. Так как вы быстро теряете тепло, вам становится холодно.

\* На самом деле температуру межпланетного пространства в конкретной точке определяют как температуру небольшого шарика из абсолютно черного вещества, помещенного на соответствующем расстоянии от звезды. На орбите Земли, то есть за пределами земной атмосферы, такой шарик нагреется до 277 K. Даже в межгалактическом пространстве он согреется до 2,7 K — температуры реликтового излучения.



Вы можете несколько облегчить свое положение, если встанете под раскидистым деревом. Даже в холодную погоду дерево гораздо теплее космического пространства и испускает в вашу сторону гораздо больше тепла, чем пространство над ним. И хотя дерево не заменит вам костер, но все-таки чуть-чуть поможет вам сохранить тепло.

Но коль скоро воздух над деревом имеет такую же температуру, как и дерево, вы можете спросить: почему же воздух сам по себе не помогает вам сохранить тепло? Ответ заключается в том, что воздух сравнительно прозрачен для инфракрасного излучения, он поглощает и испускает относительно малую его часть.

Поскольку в воздухе взаимодействуют с инфракрасным излучением только водяной пар, углекислый газ и некоторые другие газы, излучательная способность воздуха невелика. Когда над вами нет ничего, кроме ясного темного неба, вы почти не обмениваетесь с атмосферой тепловым излучением; обмен идет в основном с безвоздушным пространством за ее пределами. В отличие от атмосферы, это пространство является абсолютно черным телом с коэффициентом излучения, равным единице, и температурой около 2,725 К. Его тусклое тепловое свечение — слабый отголосок, остывающий след ранней горячей Вселенной на стадии примерно 400 000 лет спустя после Большого взрыва.

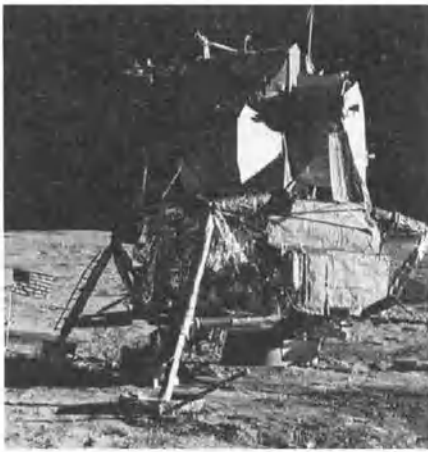
Излучение играет важную роль, когда вам холодно или жарко. Когда вы мерзнете, то хотите обмениваться тепловым излучением с горячими, но никак не с холодными объектами. Когда вам жарко — все наоборот. Мы уже знаем, что черная поверхность идеальна для теплового обмена с другим телом, но как быть в том случае, когда вы не хотите обмениваться теплом? И вот тут на сцену выходят зеркальные, белые и прозрачные поверхности.

Идеально зеркальная или идеально белая поверхность имеет коэффициент излучения, равный нулю. Эти два вида поверхности очень близки по своим свойствам: зеркальная поверхность отражает всю падающую на нее лучистую энергию, а белая рассеивает эту энергию по всем направлениям. Хотя они имеют различный внешний вид, обе поверхности подавляют лучистый теплообмен. Когда вы находитесь рядом с идеально зеркальной или идеально белой поверхностью, она отправляет вашу тепловую энергию обратно к вам и мешает вашему теплообмену с тем, что скрыто под этой поверхностью.

Зеркальные и белые поверхности можно использовать в качестве теплоизоляторов. Если вы поставите перед собой свою копию — холодный манекен — и поместите между вами зеркальную или белую перегородку, то не сможете обмениваться с манекеном тепловым излучением: ваше собственное излучение будет возвращаться к вам. На самом деле, для проявления этого эффекта достаточно, чтобы один из вас был одет в белую или блестящую одежду: тот, на ком эта одежда, не будет испускать теплового излучения, а излучение второго будет отражаться этой одеждой и возвращаться к эмитенту.

Тем не менее, когда речь идет об использовании теплоизоляционных свойств зеркальных или белых поверхностей, я должен предупредить вас об одном возможном осложнении. Излучательная способность зависит от температуры, то есть эта способность может быть такой-то при 1000 °С, но совершенно другой — при комнатной температуре. Поскольку при комнатной температуре тепловое излучение в основном состоит из невидимого для нас инфракрасного света, трудно оценить излучательную способность предмета, просто взглянув на него. Предмет, который кажется белым или зеркальным в терминах видимого света, совсем не обязательно будет таким же для инфракрасного при той же комнатной температуре. На самом деле он может прекрасно поглощать инфракрасный свет и поэтому в этих условиях будет черным «с точки зрения» теплового излучения!

Отличная иллюстрация этой проблемы — обычная одежда. Почти все используемые в текстильной промышленности материалы, независимо от того, какого цвета мы их видим, в инфракрасном диапазоне являются черными и при комнатной температуре имеют коэффициент излучения около 1. Это означает, что ваша одежда, скорее всего, излучает тепловую энергию почти с максимально возможной интенсивностью для данной температуры. Основное исключение из этого правила — металлизированные ткани и ламе (материалы с металлическими нитями). Сверкающая металлическая поверхность этих тканей обеспечивает им пониженную излучательную способность при комнатной температуре.



**Рис. 7.4.3.** Для уменьшения излучения этот лунный посадочный модуль покрыт отражающей фольгой. В результате он излучает и поглощает относительно мало тепловой энергии.

**1** Пожарные, борющиеся с лесными пожарами, иногда попадают в огненные ловушки и должны постараться выжить, пока над их головами бушует пламя. Их шансы значительно возрастают, если они используют небольшие индивидуальные укрытия с блестящими металлическими поверхностями. Прижимаясь к прохладной земле под таким похожим на палатку укрытием, пожарный более или менее изолирован от огня. Если он укрывается в низине и поблизости нет ничего, что могло бы загореться, и если к тому же он не прикасается к палатке, теплопроводность и конвекция смогут передать ему относительно немного тепла. А благодаря блестящей поверхности с низкой излучательной способностью, которая отражает основную часть теплового излучения огня, передача тепла посредством излучения также значительно уменьшается. 29 августа 1985 г. 73 пожарных были в течение нескольких часов блокированы огнем во время пожара в национальном парке Салмон возле города Салмон, штат Айдахо, и выжили только благодаря индивидуальным противопожарным укрытиям.

В инфракрасном свете металлы часто выглядят совсем иначе, чем в видимом. Например, в лунном модуле программы “Аполлон” (рис. 7.4.3) для теплоизоляции использовалась золотая, а не алюминиевая фольга, потому что золото в инфракрасном свете обладает большей отражающей способностью, чем алюминий. Несмотря на желтоватый оттенок, коэффициент излучения золота при комнатной температуре составляет примерно 0,02, в то время как алюминия — 0,05. Поэтому золотая фольга была особенно эффективна для предотвращения лучистого теплообмена теневой стороны лунохода с космическим пространством.

Коэффициент излучения прозрачных поверхностей также близок к нулю, но в этом случае теплообмена не происходит из-за того, что такие поверхности пропускают тепловое излучение сквозь себя. Если вы установите прозрачную поверхность между двумя телами, холодным и горячим, поверхность не будет препятствовать излучению. Оба тела будут обмениваться тепловым излучением, как будто между ними ничего нет.

По-настоящему прозрачная одежда не стала бы препятствием для излучения, но так как материалов для одежды, прозрачных для теплового излучения при комнатной температуре, очень мало, я не буду останавливаться на этой теме. Тем не менее материалы, прозрачные для высокотемпературного теплового излучения (т. е. видимого света) широко распространены и хорошо известны. Художник-стеклодув на собственном печальном опыте не раз убеждается, что прозрачный материал, с которым он работает, никак не предупреждает о том, что им можно обжечься. Излучение стекла при высокой температуре настолько мало, что его свечение едва можно увидеть.

Эти особенности лучистого теплообмена объясняют, почему мы носим одежду определенных цветов и почему мы так осторожно относимся к прямому воздействию солнечных лучей. В жаркие солнечные дни имеет смысл носить светлые тона и прятаться в тени — ведь и то и другое уменьшает количество тепла, которое передает нам солнце. Так как температура поверхности нашего светила составляет около 6000 К, способность одежды к поглощению солнечного света зависит от ее коэффициента излучения при высокой температуре. Светлая одежда имеет низкий коэффициент высокотемпературного излучения и поэтому не поглощает много солнечного света. Оставаясь в тени, вы избегаете прямого теплообмена с солнцем. А вот когда вам холодно, то лучше надеть что-нибудь темное и выйти посидеть на солнышке.

В то время как одежда с низкой излучательной способностью помогает вам сохранить тепло в холодную пасмурную погоду, большинство видов одежды излучают тепло с излишней эффективностью. Обладая при комнатной температуре коэффициентом излучения, примерно равным единице, они, в сущности, ведут себя как черные и ярко светятся в невидимом спектре, излучая тепло вашего тела. Только ткани ламе и другие материалы с металлическими нитями, о которых я уже упоминал, могут использовать собственную низкую излучательную способность, чтобы замедлить потерю телесного тепла. Вот почему одеяла из полимерных тканей с металлическим покрытием включены во многие аварийно-спасательные комплекты; закутавшись в такое одеяло блестящей стороной наружу, вы не будете обмениваться тепловым излучением с окружающей средой (см. **1**). Что же касается тканей типа ламе, то они помогают не замерзнуть тем, кто обычно предпочитает минимум одежды.

## Как сохранить прохладу, когда снаружи жарко

Замедление теплообмена далеко не всегда идет на пользу. Если вы слишком хорошо задерживаете тепло, то перегреетесь. Во время спортивной тренировки или просто в жаркий день вам необходимо усилить передачу тепла вашего тела в окружающую среду, стимулируя теплопроводность, конвекцию и излучение.

Вы можете усилить теплоотдачу, переместившись в область холодного воздуха или, еще лучше, в воду. Чем больше разница температур, тем выше скорость прохождения тепла через кожу, то есть теплопроводность. Теплоотдачу посредством конвекции можно активизировать, создав принудительную циркуляцию воздуха или воды с помощью соответственно вентилятора или насоса. Чем больше холодного воздуха или воды непосредственно контактирует с вашим телом, тем больше тепла

вы теряете. Что касается теплоотдачи посредством излучения, то ее можно усилить, просто встав у открытой дверцы холодильника. Независимо от того, что на вас надето, ваша одежда, скорее всего, будет черной для теплового излучения тела и вы будете излучать гораздо больше тепла в сторону холодильника, чем он — в вашу.

Но что происходит, когда температура вокруг вас выше, чем температура вашего тела? Если вы — самый холодный объект в окружающем пространстве, то вы будете становиться все горячее и горячее. На несколько минут изолирующая одежда задержит повышение вашей температуры, так что вы успеете вытащить противень из духовки или спасти человека из огня. Но даже если вы полностью изолированы от окружающей среды, ваш собственный обмен веществ приведет к тому, что температура все равно будет расти. Что же предпринимает ваш организм, чтобы спастись от перегрева?

Он заставляет вас потеть.

Покрывая кожу слоем воды, ваш организм использует хитрый прием, помогающий вам избежать перегрева. Чтобы вода испарилась, превратилась из жидкости в газ, нужна энергия, скрытая теплота парообразования. Как мы уже говорили в разделе 7.2, молекулы в жидкой воде удерживаются вместе химическими связями. Их нужно разрушить, чтобы превратить воду в пар. Энергия для разрыва этих связей и испарения пота берется из вашего тела в виде тепла. Чем быстрее испаряется пот, тем больше тепла он вытягивает из вашей кожи. Пока вы продолжаете потеть, а воздух остается достаточно сухим, чтобы пот испарялся, вы можете поддерживать обычную температуру тела несмотря на то, что вас окружает очень горячий воздух.

Покрытые шерстью животные не способны потеть так же, как люди, потому что непосредственно у их кожи циркулирует недостаточно воздуха, который мог бы унести водяные пары. Вместо этого животные часто и тяжело дышат, и тепло уносится из их тел испарением через легкие и слизистую оболочку пасти. В жаркий день или после долгого бега собака высовывает язык, чтобы слюна испарялась и охлаждала животное.

## Теплоизоляция зданий

Чтобы регулировать тепловые потоки в домах, используют в общем-то те же способы, которые позволяют сохранять тепло телам людей и животных. При этом, поскольку дома со всем их содержимым не особенно часто двигаются с места, можно использовать тяжелые, громоздкие, негибкие или хрупкие устройства. Давайте рассмотрим некоторые схемы теплоизоляции зданий.

Цель теплоизоляции — сделать так, чтобы температура внутри дома не зависела от температуры наружного воздуха. Когда на улице холодно, вы хотите, чтобы из вашего теплого дома уходило как можно меньше тепла. Когда на улице жарко, вы хотите, чтобы как можно меньше тепла проникало в дом извне. Поэтому при строительстве вы используете теплоизоляционные материалы.

Несмотря на то, что существует множество строительных материалов, которые плохо проводят тепло — стекло, пластик, волокно, песок, глина, — однако самый лучший теплоизолятор в обычном строительстве — это воздух. В большинстве современных зданий используется воздушная теплоизоляция. К сожалению, воздух подвержен конвекции, поэтому его нельзя использовать непосредственно, как любой другой стройматериал. Для предотвращения конвекции воздух закачивают в пористые материалы или смешивают с волокнистыми — это могут быть стекловата, опилки, пенопласт и тому подобное.

Стекловолокно или стеклопластик получают вытягиванием расплавленного стекла в очень длинные и тонкие волокна, которые затем взбивают, словно сахарную вату. Обычное стекло и само по себе плохо проводит тепло, но когда оно превращено в волокна, его теплоизоляционные свойства становятся еще сильнее. При передаче по перепутанным волокнам тепло должно пройти очень длинный и извилистый путь, преодолеть который удается лишь очень малой части тепла. Большую часть объема стекловолокна занимает воздух. Стекланные волокна препятствуют конвекции, поэтому воздух передает тепло за счет теплопроводности.

Надо признать, что стекловолокно вместе с насыщающим его воздухом — прекрасный теплоизолятор. Но у стекловолокна есть и еще одно преимущество — оно не горит. Поэтому его используют не только для теплоизоляции зданий, но



**Рис. 7.4.4.** Хотя камень не назовешь хорошим проводником тепла, он все же далеко не такой мощный теплоизолятор, как стекловолокно с содержащимся в нем воздухом. В средневековых замках зимой было чрезвычайно холодно, потому что тепло слишком легко утекало через их каменные стены. Этот гобелен замедляет выход тепловой энергии наружу и помогает удерживать в зале тепло.

**Рис. 7.4.5.** Пространство между косым потолком чердака и кровлей здания заполнено толстым слоем стекловолокна (слева); значение изоляции становится отчетливо видно в снежный день — когда снег сначала тает в тех местах, где слой стекловолокна самый тонкий из-за того, что он сжат обрешеткой стропил (справа).



и в духовках, водонагревателях и многих других устройствах, в которых требуются негорючие теплоизоляторы. В большинстве современных зданий в наружные стены вложен слой стекловолокна толщиной 10–20 см. Один из старинных способов теплоизоляции помещений показан на **рис. 7.4.4**.

Поскольку теплый воздух поднимается вверх, а холодный опускается вниз, разница температур между теплым воздухом под кровлей и холодным воздухом над ней может быть довольно значительной. Поэтому кровля требует усиленной теплоизоляции. Слой стекловолокна, который укладывают под кровлю в современных домах, может достигать 30 см (**рис. 7.4.5**).

Несмотря на великолепные теплоизоляционные свойства стекловолокна, в некоторых случаях применяют другие материалы. Листы полиуретана и пенополистирола обладают еще более высокими, чем стекловолокно, изолирующими свойствами и к тому же водонепроницаемы. К сожалению, эти материалы легко воспламеняются, и к тому же с ними относительно трудно работать. Тем не менее подобные полимеры используются в строительстве, однако особенно часто применяются для изоляции холодильников и при изготовлении кофейных чашек с термоизоляцией, где отсутствие гибкости и горючесть не имеют значения.

В старых домах, которые не были должным образом изолированы во время строительства, положение можно исправить, впрыснув жидкий изолятор через отверстия в стене или в перекрытии. Эти изоляторы также представляют собой пористые или волокнистые материалы, поэтому основным изолирующим веществом служит наполняющий их воздух. Карбамидо-формальдегидный пенопласт удобен для заполнения пустот в стенах и потолках, поскольку его можно закачать в жидком виде в эти пустоты, где он и затвердеет. С другой стороны, имеются опасения, что подобные строительные материалы выделяют токсичные вещества, и это ограничивает их применение. Поэтому для заполнения пустот чаще всего применяют вермикулит и огнестойкие материалы на основе целлюлозы (эковату).

## Как проветрить дом

На первый взгляд может показаться, что идеальный вариант — заблокировать всякое движение воздуха как в дом, так и из дома, чтобы полностью предотвратить теплообмен. На самом деле жить в таком запечатанном доме было бы неприятно, и не слишком полезно для здоровья. Любой запах держался бы неделями, потому что не мог бы покинуть дом. Старые дома достаточно хорошо продуваются, и обмен воздухом происходит много раз за день. Но современные энергоэффективные дома почти герметичны, и обмен воздухом с внешней средой происходит лишь несколько раз в день.

Один из способов целенаправленного обмена воздухом (но не теплом) — противоточный обмен. Существуют специальные вентиляторы, в которых входящий и выходящий потоки воздуха проходят рядом друг с другом с противоположных сторон тонких металлических трубок, при этом входящий воздух обменивается теплом с выходящим. К тому же моменту, когда входящий воздух попадает в помещение, его температура уже близка к комнатной. В принципе, в таких противоточных вентиляторах количество тепла, вовлеченное в обмен с внешней средой, очень невелико. Но, к сожалению, эту технологию сложно использовать по-настоящему эффективно, и эксплуатация подобных вентиляторов часто требует больше энергии, чем они экономят.

В большинстве случаев теплоизоляция эксплуатирует изолирующие свойства воздуха, наполняющего поры или волокна, но в некоторых ситуациях пористые и тонкоизмельченные материалы не годятся.

Например, окна, как ни крути, должны быть прозрачными. Их нельзя заполнить пеной или стекловолокном, а обычное стекло — недостаточно хороший теплоизолятор. Наиболее распространенный способ обеспечить теплоизоляцию окна — использование стеклопакетов, то есть двух (или более) параллельных стекол, разделенных более или менее узким пространством. Эти вертикальные камеры иногда заполняются инертными газами (азотом или аргоном). Таким образом предотвращается передача тепла посредством теплопроводности от одной стороны окна к противоположной. Несмотря на то что внутри камеры может происходить конвекция, образующаяся конвективная ячейка слишком узкая и высокая, чтобы обеспечить эффективную теплопередачу.

Но если стеклопакеты установлены не вертикально (например, на кровле), в них могут образовываться уже достаточно эффективные конвективные ячейки, то есть теплоизоляция ухудшится. И даже когда стеклопакеты установлены вертикально, они обеспечивают теплоизоляцию в гораздо меньшей степени, чем стены. Это лишний аргумент в пользу занавесок и штор: эти дополнительные поверхности не только не дают посторонним заглядывать к вам в дом, но и уменьшают теплоотдачу через окно.

Вероятно, самый большой недостаток обычных стеклопакетов состоит в том, что они не могут регулировать лучистый теплообмен. Несмотря на то что обычное стекло прозрачно для видимого света, с точки зрения теплового излучения при комнатной температуре оно близко к черному — его коэффициент излучения составляет примерно 0,92. Это означает, что стекла обычного стеклопакета постоянно обмениваются тепловым излучением практически с максимальной эффективностью. Когда разница температур между внутренним и наружным стеклами велика, тепло в виде теплового излучения будет переходить от более горячей панели к холодной, тем самым ухудшая теплоизоляцию.

В усовершенствованных стеклопакетах лучистый теплообмен снижен за счет того, что используются специальные низкоэмиссионные стекла с малой излучательной способностью. На внутреннюю поверхность одного из стекол такого окна нанесено тонкослойное покрытие, придающее стеклянному поверхности свойства зеркальной: стекло отражает инфракрасное излучение, при комнатной температуре не излучает тепла и отражает обратно тепловое излучение противоположного стекла. При этом, поскольку покрытие отражает только инфракрасный свет, для человеческого глаза окно по-прежнему остается прозрачным. Покрытие работает как «тепловое зеркало» — оно отражает инфракрасное тепловое излучение, но пропускает видимый свет: через такое окно видно так же хорошо, как через обычное, но его скрытые тепловые зеркала резко снижают теплообмен.

Типичное низкоэмиссионное покрытие обеспечивает коэффициент излучения около 0,10, то есть почти такой же, как у настоящего металлического зеркала. Изготовленное из металлов и/или их оксидов, это покрытие использует различные физические явления для того, чтобы отражать инфракрасный свет и пропускать видимый.

В одном из наиболее распространенных вариантов покрытий используется оксид индия-олова: в тонких слоях он прозрачен и при этом превосходный проводник (поэтому он также широко применяется в электронных дисплеях). Индий-оловянный оксид контролирует показания большинства электронных часов, так что вы, вероятно, смотрите сквозь него всякий раз, когда бросаете взгляд на свои часы! Этот материал прозрачен в видимом свете, потому что имеет низкую плазменную частоту — частоту свободных колебаний подвижных зарядов в электрическом проводнике. Электрические провода плохо проводят электричество на частотах выше своей плазменной частоты. Как мы убедимся позже, частоты волн видимого света выше, чем у инфракрасного. В то время как индий-оловянный оксид может реагировать и отражать низкочастотное инфракрасное излучение, его плазменная частота слишком низка для того, чтобы реагировать и отражать высокочастотный видимый свет (более подробно о плазменных частотах см. ❷).

❷ Плазменная частота большинства металлов настолько высока, что можно ожидать, что они будут полностью отражать весь видимый диапазон спектра и даже часть ультрафиолетового. Алюминий, например, почти идеально отражает все цвета радуги. Но квантовая физика металлов, с которой мы встретимся на с. 422, усложняет дело, и прежде всего это относится к металлам, которые традиционно использовались для чеканки монет. У золота, серебра и меди доступен только узкий диапазон незаполненных уровней проводимости, следовательно, они с трудом взаимодействуют с фотонами и отражают их в фиолетовой части видимого спектра. Серебро имеет теплый тон, потому что плохо отражает фиолетовый. Золото кажется желтоватым, потому что как следует не отражает ни синий, ни фиолетовый. И наконец, медь рыжеватого цвета, потому что с трудом отражает даже зеленые фотоны.



**Рис. 7.4.6.** На первый взгляд у этой серебряной кофеварки нет никакой теплоизоляции, но на самом деле это не так. Ее полированная серебряная поверхность так сверкает, что представляет собой почти идеальное зеркало и для инфракрасного, и для видимого света. В результате при комнатной температуре она почти не излучает и не поглощает тепла. Кроме того, воздух вблизи вертикальных стенок кофеварки образует высокие конвективные ячейки, которые уносят от прибора сравнительно мало тепла. В целом кофеварка теряет тепло гораздо медленнее, чем если бы она была черной и имела меньше вертикальных поверхностей.

К сожалению, стеклопакеты рано или поздно теряют герметичность, и наполняющий их и не содержащий влаги газ с низкой теплопроводностью замещается обычным воздухом. Когда “протекает” обычный стеклопакет, он, как правило, просто затуманивается. Когда начинает протекать низкоэмиссионный, то наружный воздух, в котором всегда есть влага, иногда вступает в химическое взаимодействие с покрытием и оно меняет цвет. В большинстве случаев вам придется менять целиком весь стеклопакет — и стекла, и раму.

## Теплоизоляция продуктов

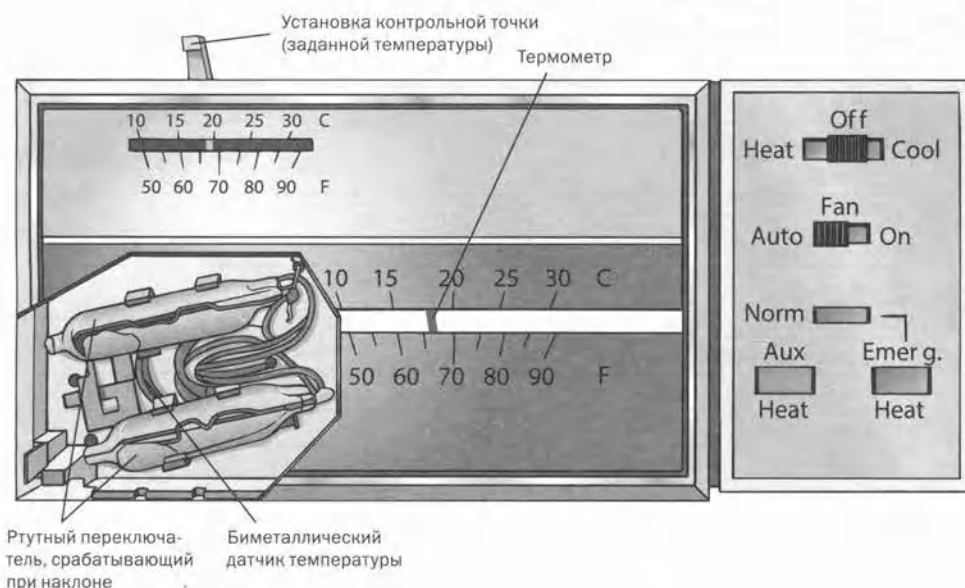
Для сохранения продуктов часто используются теплоизоляционные материалы, такие как пенопласт и картон. Например, кофейные стаканчики из пенополистирола так хорошо удерживают тепло, что ваш кофе остается горячим все то время, что вы едете на работу, особенно если вы еще закроете стаканчик крышечкой — для предотвращения теплопотерь посредством испарения. Иногда для предотвращения потерь тепла используются довольно необычные способы: теплоизоляция полированной серебряной кофеварки на **рис. 7.4.6** обеспечивается высокой отражательной способностью серебра. Полированное серебро настолько слабо излучает тепло, что теплопотери происходят только за счет конвекции. А так как поверхности у самовара в основном вертикальные, то и конвекция не очень эффективно отбирает у него тепло.

Но если вы попытаетесь сохранить пищу горячей или холодной в течение долгого времени, вы увидите, что даже довольно толстый слой вспененного или волокнистого изоляционного материала — недостаточно надежный барьер на пути переноса тепла. Гораздо лучше воспользоваться стеклянным или металлическим термосом, в котором используется совершенно другой метод изоляции — вакуум.

Термос — это бытовая версия сосуда Дьюара, названного так по имени изобретателя, сэра Джеймса Дьюара, разработавшего это устройство в конце XIX века. В корпус термоса вставлена колба, а из пространства между колбой и внешним корпусом откачан воздух (**рис. 7.4.7**). Чтобы стенки корпуса и колбы выдерживали сокрушительное атмосферное давление, их делают очень прочными. Поскольку между двумя стенками пустота, то отсутствует и теплопроводность, и конвекция. При этом обе стенки имеют зеркальное покрытие, поэтому у них очень низкий коэффициент излучения и они хорошо отражают тепловое излучение. Зеркальное покрытие значительно уменьшает лучистый теплообмен между стенками. Так как тепло может проникать в термос или выходить из термоса только через узкое горлышко, правильно изготовленный термос может сохранять пищу или напитки горячими или холодными на удивление долго.



**Рис. 7.4.7.** В термосе (сосуде Дьюара) для теплоизоляции внутренней колбы используется вакуум. Вакуум не может проводить тепло и не подвержен конвекции, зеркальные стенки обеих колб уменьшают также и передачу тепла посредством излучения. Единственная заметная утечка (или поступление) тепла происходит через узкое горло сосуда в месте соединения двух стенок.



## 7.5 Термометры и термостаты

Знать температуру очень важно в самых разных случаях: когда вы собираетесь на пикник, печете хлеб или лежите в постели с гриппом. Вы пользуетесь термометром, чтобы узнать, тепло ли на улице, разогрелась ли духовка и нет ли у вас жара. Термометр может измерять температуру, потому что свойства его составных частей меняются пропорционально изменению температуры. В этом разделе мы рассмотрим некоторые такие изменения, чтобы понять, как работают термометры.

Но бывают ситуации, когда вам нужно не только измерять, но и регулировать температуру. Вы не просто хотите узнать, какая температура в вашем доме, вы хотите поддерживать ее на определенном уровне. В этом случае вам нужен термостат — термометр, который использует собственные показания для управления другим оборудованием.

### Стеклянные термометры и жидкостные термостаты

Температура играет такую огромную роль в нашей повседневной жизни, что нам постоянно приходится ее измерять и часто — регулировать. Когда вы размышляете, что надеть, печете пирог или следите, чтобы молоко не “убежало”, вы, скорее всего, учитываете температуру. К счастью, температуру достаточно легко измерить. Многие свойства веществ изменяются в зависимости от температуры, и устройство термометров и термостатов основано на этой зависимости.

Классический стеклянный термометр измеряет температуру, используя тепловое расширение, с которым мы уже познакомились на с. 241, обсуждая лампы накаливания. В лампе накаливания нужно минимизировать разницу в тепловом расширении материалов, чтобы лампочка не лопалась при нагревании или охлаждении. В стеклянном термометре разница в тепловом расширении, наоборот, помогает измерить температуру.

Позвольте напомнить, что степень расширения веществ с повышением температуры описывается коэффициентом объемного теплового расширения — относительным изменением объема материала, вызванным повышением температуры на 1 °C. Коэффициенты объемного расширения ряда распространенных веществ и материалов приведены в таблице 7.5.1.

❶ Термометр Галилея — это набор стеклянных шариков различной массы, которые плавают или тонут в наполненном жидкостью сосуде. При повышении температуры жидкость расширяется быстрее, чем стекло. При этом плотность жидкости понижается, а значит, уменьшаются и действующие на шарики архимедовы силы выталкивания. Чем выше температура, тем труднее шарикам оставаться на плаву в расширяющейся жидкости, тем большее их число опускается на дно. На каждом шарике указана температура, выше которой он тонет. Чтобы определить температуру, вы выбираете наименьшее значение из указанных на тех шариках, которые все еще плавают.

Таблица 7.5.1. Коэффициенты объемного расширения (КОР) некоторых распространенных материалов при комнатной температуре

Вещество или материал	КОР × 10 <sup>-6</sup>
Спирт (этанол)	1400
Спирт (метанол)	1490
Алюминий	69
Латунь	57
Кобальт	41
Медь	50
Стекло (обычное)	26
Стекло жаропрочное	9,6
Стекло (кварцевое)	1,6
Стеклокерамика	<1,0
Железо	35
Свинец	86
Ртуть	181
Никель	38
Серебро	57
Нержавеющая сталь	48
Олово	66
Титан	26
Цинк	90

Понять, как работает стеклянный термометр, очень просто. Жидкость в трубке термометра расширяется при повышении температуры гораздо быстрее, чем стекло трубки. Поэтому жидкость, стремясь заполнить больший объем, поднимается по трубке и показывает, на сколько градусов возросла температура.

Как мы видим на рис. 7.5.1, полый корпус термометра содержит некоторое количество ртути или окрашенного спирта, достаточное для того, чтобы целиком заполнить весь резервуар (колбу) и часть соединенной с резервуаром полой капиллярной трубки. По мере роста температуры термометра и жидкость, и стекло трубки расширяются, но жидкость расширяется быстрее, чем стекло. Хотя объем стеклянной колбы также немного увеличивается при расширении (и поэтому там может поместиться чуть больше жидкости), жидкость все же выдавливается из колбы в капилляр. Столб жидкости в капилляре становится все выше, и вы наблюдаете, как растет красная или серебряная полоска. Верхнюю часть капилляра теоретически можно оставить открытой, но обычно ее запечатывают для удобства эксплуатации. О некоторых интересных особенностях жидкостных стеклянных термометров (см. ❶).

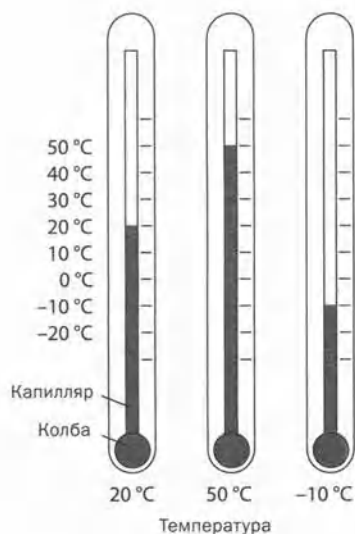


Рис. 7.5.1. Коэффициент объемного расширения жидкости внутри стеклянного термометра больше, чем у стекла. При повышении температуры избыток жидкости вытесняется из колбы в основании термометра, и тонкий столбик жидкости в капилляре становится выше. При понижении температуры жидкость возвращается в колбу, и уровень жидкости в капилляре опускается.

Когда-то ртуть очень широко использовалась в бытовых термометрах, но со временем ее в большинстве случаев вытеснил спирт. У ртутных термометров больший диапазон по сравнению со спиртовыми, однако ртуть — коварный яд, способный накапливаться в организме, и разбитый ртутный термометр представляет собой долгосрочную опасность. Кроме того, у спирта есть и еще одно важное преимущество по сравнению с ртутью: с ростом температуры он настолько увеличивает объем, что спиртовую капиллярную трубку можно сделать более широкой, чем ртутную, и показания термометра гораздо удобнее разглядеть.

Так или иначе, медицинские ртутные термометры постепенно исчезают из продажи. Капилляры этих элегантных изделий сужены у основания, чтобы ртуть могла расширяться, когда термометр находится во рту или под мышкой у больного, но не уходила бы обратно, когда термометр вынимают и он охлаждается. Слабых сил сцепления (так называемых когезионных сил) в тончайшем столбике ртути недостаточно для того, чтобы ртуть смогла через узкое “горлышко” опуститься обратно в колбу. Поэтому столбик ртути разрывается между “горлышком” и ртутной колбой. Так как столбик ртути в течение долгого времени остается неподвижным, вы може-



те прочитать показания термометра, когда захотите. Чтобы вернуть ртуть в колбу и заполнить зазор, нужно энергично встряхнуть термометр. При этом инерционные силы проталкивают ртуть через сужение, и термометр снова готов к работе.

Еще одна остроумная разновидность стеклянного термометра, до сих пор встречающаяся в обиходе, может фиксировать максимальную и минимальную температуру. Как показано на рис. 7.5.2, этот термометр состоит из U-образного капилляра и заполненной жидкостью колбы, которая расположена наверху, на одном из концов капилляра.

Термометр содержит две различные жидкости, одна из которых способна к большому тепловому расширению, а другая просто служит индикатором значения температуры. В качестве расширяющейся жидкости, как правило, используют спирт. Он заполняет колбу и примыкающую к ней верхнюю часть капилляра. В качестве жидкости-индикатора обычно выступает ртуть или какой-либо ее заменитель. Ртуть занимает нижнюю часть U-образного капилляра. Разрыва между двумя жидкостями нет, они встречаются в определенной точке на той стороне капилляра, на которой находится колба. Несмотря на то, что ртуть также несколько расширяется при повышении температуры, в данном случае этим можно пренебречь ради простоты объяснений. Жидкости в термометре не смешиваются, как не смешиваются, например, масло и вода.

Когда температура повышается, расширяющаяся жидкость выходит из колбы и опускается вниз по левой стороне капилляра. Она толкает перед собой столбик ртути, которая выдавливается вверх по правой (открытой) стороне. Вы можете считать показания термометра по высоте столбика ртути и слева, и справа. Чем выше поднимается ртуть в правой стороне капилляра, тем выше температура. Поэтому на открытой стороне термометра нанесена обычная температурная шкала, снизу вверх. Однако чем выше (в сторону колбы) поднимается ртуть в правой стороне капилляра, тем ниже температура. Вот почему на этой стороне термометра нанесена перевернутая шкала, сверху вниз.

В этот необычный термометр “двойного чтения” добавлены еще два миниатюрных индикатора *min* и *max*, по одному на каждой из сторон капилляра. Эти указатели не могут свободно передвигаться по капилляру (как правило, благодаря тому, что они намагничены и удерживаются магнитами, укрепленными с обратной стороны капилляра). Но если в исходном состоянии, когда ртуть не касается их, эти индикаторы остаются на месте, то при изменении температуры ртуть все же может сдвинуть их вверх по соответствующей стороне капилляра. При этом индикатор либо плавает на поверхности жидкости (например, железо будет плавать на ртути), либо не смачивается этой жидкостью — например, воск не смачивается водой (если последняя используется в качестве индикаторной жидкости). Так или иначе, указатель будет перемещаться вверх вместе с уровнем индикаторной жидкости, но когда этот уровень вновь начнет опускаться, указатель не опустится вместе с ним.

По мере того как температура колеблется вверх и вниз, индикаторная жидкость также движется то в одну, то в другую сторону от нижней точки U-образного капилляра. Столбик жидкости время от времени будет то с одной, то с другой стороны сдвигать с места и толкать вверх указатели. Поскольку последние, как мы уже говорили, могут только подниматься, но не опускаться, индикатор в левой части капилляра останется на высоте, соответствующей минимальной температуре за определенный период измерений. Правый же индикатор зафиксирует максимальную температуру за этот же период.

Чтобы сбросить максимальные и минимальные значения, нужно вернуть индикаторы к верхушке столбика ртути. В некоторых моделях термометров индикаторы сдвигаются вниз при помощи специальных магнитов, в других, наоборот, нажатием кнопки отодвигают от капилляра магнит, удерживающий индикатор на месте, так что последний опускается под действием собственного веса.

Разница в тепловом расширении используется также и в термостатах — устройствах, которые управляют оборудованием, измеряя температуру в ходе тех или иных процессов. У вас дома наверняка есть несколько термостатов, часть из которых спрятана внутри различных нагревательных приборов — тостеров, утюгов, сушилок, кофеварок. Термостаты есть и в тех устройствах, которые на первый взгляд не связаны с измерениями температуры, — в компьютерах и блоках пита-

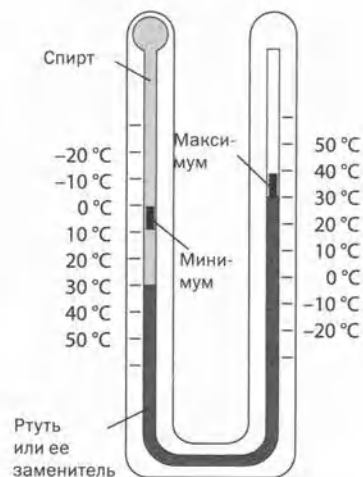


Рис. 7.5.2. Этот стеклянный термометр фиксирует максимальную и минимальную температуру. Объем расширяющейся жидкости меняется с изменением температуры, в результате индикаторная жидкость движется туда и обратно через нижнюю часть U-образного капилляра. Указатели могут подниматься, когда индикаторная жидкость толкает их вверх, но трение не дает им опускаться, когда индикаторная жидкость движется вниз. Нижняя поверхность указателя со стороны колбы фиксирует минимальную температуру, указателя на открытой стороне капилляра — максимальную. Максимальное и минимальное показания сбрасываются с помощью магнита.

ния. У вас в организме тоже работает целая коллекция термостатов, благодаря чему вы поддерживаете близкую к постоянной температуру тела.

Самый простой термостат работает по принципу стеклянного термометра. В этой схеме при повышении температуры жидкости расширяется, выходит из резервуара и приводит в действие выключатель. Такого рода термостаты используются во многих духовках, где они регулируют подачу газа или электричества. Если температура в духовке поднимается выше заданного значения, выключатель термостата отключает горелку. Когда температура в духовке падает значительно ниже желаемой, выключатель вновь зажигает горелку. Таким образом термостат поддерживает температуру в пределах довольно узкого диапазона.

Духовки, в которых используется подобный тип термостата, снабжены специальной колбочкой, обычно укрепленной в верхней части рабочей камеры и заполненной жидкостью. Колбочка посредством тонкой металлической трубки соединяется с блоком управления духовкой, где трубка примыкает к маленькому цилиндру, внутри которого ходит подвижный штифт. По мере роста температуры поток расширяющейся жидкости из колбы проходит через трубку в цилиндр и толкает штифт, который начинает выдвигаться с противоположной стороны цилиндра.

Чем горячее в духовке, тем больше выдвигается наружу штифт. Когда нужная температура достигнута, штифт упирается в переключатель и выключает источник тепла. Чем выше заданная температура, тем дальше от цилиндра должен быть расположен переключатель. Одно из примечательных достоинств этого простого механизма заключается в том, что для управления газовой духовкой ему вообще не нужно электричество.

## Металлические термометры: биметаллические пластины

Не у всех термометров принцип действия основан на расширении жидкостей. В некоторых разновидностях термометров используются металлические пластины. Но поскольку коэффициенты объемного расширения твердых тел значительно ниже, чем у жидкостей, изготовить чувствительные металлические термометры не так-то просто. Разница между тепловым расширением жидкостей и твердых тел обусловлена фундаментальными отличиями в их микроскопической структуре. Мне хотелось бы немного на этом остановиться.

Атомы и молекулы большинства твердых веществ жестко удерживаются вместе и формируют упорядоченные структуры — кристаллы (рис. 7.5.3). Большинству из нас при слове “кристалл” приходят на память красивые разноцветные призматические кристаллы драгоценных и полудрагоценных минералов в геологических музеях и сувенирных магазинах.

Природные грани этих кристаллов отражают ту высшую степень упорядоченности, которая свойственна кристаллическим твердым телам на атомном и молекулярном уровне. Атомы и молекулы кристалла выстраиваются в решетку почти идеальной регулярности — повторяющуюся единообразную структуру, которая напоминает аккуратные пирамидки апельсинов или штабеля коробок на складе. Кристаллическая структура присуща не только драгоценным минералам. Большинство твердых тел, в том числе и металлы, являются кристаллическими, и их частицы расположены в решетках в определенном порядке.

В отличие от твердых тел, жидкости, как правило, не имеют кристаллической структуры (рис. 7.5.4). Частицы обычной жидкости не образуют упорядоченную решетку и даже не могут долго сохранять одно и то же расположение относительно друг друга. Несмотря на то, что большую часть времени молекулы жидкости хоть и слабо, но связаны с соседями, эти соседи постоянно меняются. В жидкости, по сравнению с твердыми веществами, гораздо выше уровень микроскопической активности, и именно этот дополнительный уровень маневренности и подвижности обуславливает высокую теплоемкость жидкостей и большой коэффициент их объемного расширения.

Когда вы сообщаете кристаллу тепло, большая часть этого тепла идет на активизацию колебаний частиц, и таким образом температура кристалла повышается. Вот почему твердые вещества имеют относительно невысокую теплоемкость: требуется не так уж много тепловой энергии, чтобы увеличить температуру кристалла. Повышение интенсивности колебаний также приводит к увеличению

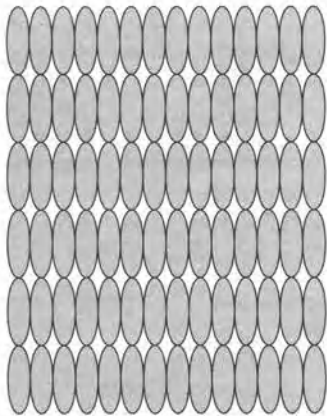
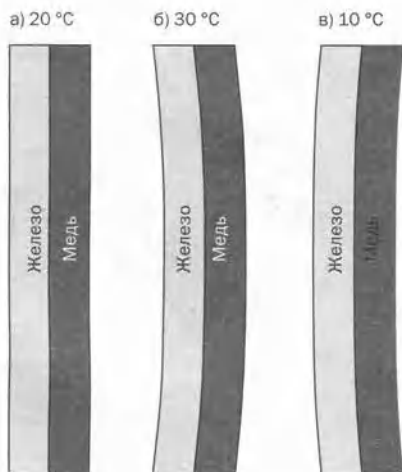


Рис. 7.5.3. В кристаллическом твердом веществе атомы или молекулы упакованы в высокоупорядоченную решетку.



Рис. 7.5.4. В обычной жидкости атомы или молекулы расположены беспорядочно. Они касаются друг друга, но не образуют упорядоченную решетку.



**Рис. 7.5.5.** Соединенные вместе полоски меди и железа образуют биметаллическую пластину. Поскольку медь имеет более высокий коэффициент объемного расширения, чем железо, полоса изгибается в соответствии с изменением температуры. При 20 °C полоса прямая (а), но она выгибается влево при 30 °C (б) и вправо при 10 °C (в).

объема твердого тела, правда очень незначительному. Поэтому у твердых веществ относительно невысокие коэффициенты объемного расширения: в ходе нагревания они не подвергаются каким-либо существенным структурным изменениям — просто частицы в них колеблются активнее.

Но когда вы сообщаете тепло жидкости, далеко не вся тепловая энергия расходуется на активизацию колебаний. Большая ее часть вместо этого тратится на разрыв химических связей и разъединение частиц. Поэтому, чтобы повысить температуру жидкости, ей приходится добавлять гораздо больше тепла, и вот почему жидкости имеют относительно высокую теплоемкость.

Тот факт, что при нагревании жидкости происходит разрыв химических связей, имеет два важных следствия.

Во-первых, вязкость жидкости уменьшается, а текучесть увеличивается. Вот почему сироп легче выливается из сосуда, если его сначала нагреть. Во-вторых, объем жидкости существенно возрастает, поскольку упаковка частиц становится еще более рыхлой, когда они отделяются друг от друга и занимают дополнительное пространство. Этот эффект распаковки отсутствует у кристаллов, частицы которых и при нагревании остаются в решетке. Вот почему коэффициенты объемного расширения жидкостей обычно больше, чем у твердых веществ.

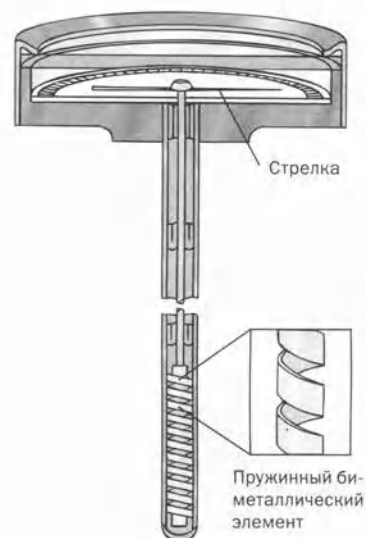
Несмотря на небольшие коэффициенты объемного расширения, металлы широко используются в термометрах. В основе наиболее распространенного вида металлического термометра — биметаллическая пластинка, состоящая из узких полосок двух различных металлов (например, меди и железа), которые соединены вместе в конструкцию, напоминающую бутерброд (**рис. 7.5.5**). Поскольку два металла имеют различные коэффициенты объемного расширения, при изменении температуры пластинка деформируется. Медь имеет более высокий коэффициент объемного расширения, чем железо, поэтому медный слой сильнее расширяется, когда пластинку нагревают, и больше сокращается, когда ее охлаждают.

Поскольку два слоя пластинки расширяются или сжимаются в разной степени, сама она при нагревании выгибается в ту или иную сторону. Есть только одна температура, при которой пластинка остается прямой (**рис. 7.5.5, а**). Если температура выше, то полоска выгибается в сторону ставшего более коротким слоя железа, а более длинный слой меди находится на внешней стороне изгиба (**рис. 7.5.5, б**). Если температура ниже, то все наоборот — пластинка выгибается в сторону более короткого медного слоя, а железо находится на внешней стороне (**рис. 7.5.5, в**). Так как форма полоски в точности зависит от температуры, из нее получается хороший термометр.

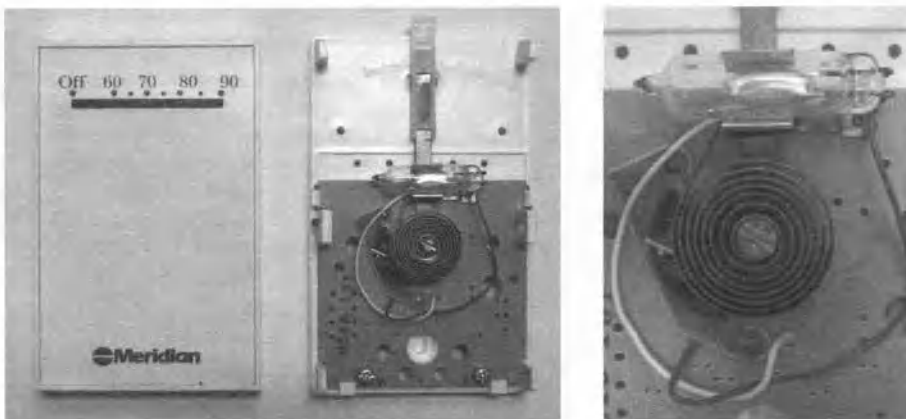
В большинстве циферблатных (то есть имеющих круглую шкалу) термометров (включая те, что употребляются для проверки готовности мяса или кондитерских изделий) используются биметаллические пластинки. Для повышения чувствительности эти пластинки изготавливают в виде маленьких спиралей (**рис. 7.5.6**) или пружин (**рис. 7.5.7**), которые скручиваются или распрямляются в зависимости от температуры. Один конец спирали крепится к раме термометра, другой прикреплен к стрелке. По мере изменения температуры устройства скручивающаяся биметаллическая спираль перемещает стрелку, чтобы показать температуру.



**Рис. 7.5.6.** В термометре холодильника для измерения температуры используется свернутая в спираль биметаллическая полоса. При охлаждении полоса раскручивается.



**Рис. 7.5.7.** Сердце кулинарного термометра — биметаллическая пластинка, свернутая в пружину. При изменении температуры пружинный элемент сжимается или растягивается и при этом передвигает стрелку.



**Рис. 7.5.8.** Спиральная биметаллическая пластина в этом бытовом термостате (показан в разобранном виде) контролирует положение ртутного выключателя, срабатывающего при наклоне. Шарик ртути перекачивается из одного конца стеклянной трубки в другой, при этом то включая, то выключая отопление.

Почти во всех термостатах систем домашнего отопления доэлектронной эры также использовались биметаллические пластины. Выключатели, присоединенные к биметаллической спирали, контролируют котел. Когда температура становится слишком высокой, спираль и выключатель отключают отопление. Когда температура падает слишком низко, спираль и выключатель вновь включают обогрев.

Выключатель котла обычно представляет собой стеклянную трубку, частично наполненную жидкой ртутью (**рис. 7.5.8**). Эта трубка прикреплена к подвижному концу биметаллической спирали — к тому же концу, что в циферблатном термометре перемещает стрелку. Когда спираль скручивается или раскручивается, ртуть перемещается из одного конца трубки в другой. В стенку трубки впаяны два электрических контакта. Когда ртуть находится в одном конце трубки, она замыкает контакты и электричество проходит через нее от одного контакта к другому. Когда ртуть перемещается на противоположный конец трубки, контакты разомкнуты и тока не возникает. Таким образом, ртутный выключатель, срабатывающий при наклоне, позволяет биметаллической спирали регулировать отопление.

Задавая температуру термостата, вы фактически изменяете ориентацию биметаллической спирали. Спираль присоединена к ручке регулятора температуры таким образом, что поворот ручки наклоняет и спираль, и ртутный выключатель. Когда вы переводите термостат на более высокую температуру, вы наклоняете спираль таким образом, что она не сможет нажать на ртутный выключатель, пока в комнате не станет жарче. Переключая термостат на более низкую температуру, вы наклоняете спираль в противоположную сторону, так что она сможет нажать на выключатель лишь при относительно низкой температуре. Когда же температура в помещении достигает заданной, термостат для ее поддержания будет время от времени то включать, то выключать отопление.

Термостаты на основе биметаллических пластин используются также в утюгах, тостерах, кофеварках и переносных обогревателях. Во всех этих приборах термостат напрямую контролирует поток электроэнергии, идущий через нагревательный элемент. Когда температура падает, биметаллическая пластина изгибается, пока не коснется металлического контакта. Как только это происходит, цепь замыкается, электрический ток течет через биметаллическую полосу к контакту, а затем через нагревательный элемент. Таким образом, всякий раз, когда термостат остывает до определенной температуры, он включает нагревательный элемент (еще об одном интересном применении биметаллических пластин см. **2**).

Термостаты, использующие прямой контакт, не так чувствительны, точны и долговечны, как те, что снабжены ртутным выключателем, зато их работа не зависит от положения в пространстве. Термостаты с выключателями, срабатывающими при наклоне, чувствительны к положению в пространстве, потому что перемещение ртути основано на гравитации. Для правильного измерения температуры такие термостаты должны быть жестко закреплены, чтобы постоянно оставаться в горизонтальном положении.

**2** Мигающие лампы, которые используются в автомобильных указателях поворота и в гирляндах праздничной иллюминации, снабжены термостатом с биметаллическими пластинами. Электрический ток нагревает нить лампы. Когда ее температура становится достаточно высокой, термостат выключает ток. Когда нить остывает, термостат вновь включает ток, нить снова нагревается. Этот процесс повторяется снова и снова и заставляет бесконечно мигать лампочки в цепи.

## Термометры на полимерных пластинах: жидкие кристаллы

Термометр на полимерных пластинах представляет собой пластиковую полоску, на которой высвечивается значение температуры (рис. 7.5.9). На пластинку нанесена шкала температур в виде цифр, но в каждый данный момент хорошо видна только одна из них. Если температура изменяется, эта цифра гаснет и становится видна другая. Пластинчатые термометры особенно удобны тем, что их можно просто приложить к поверхности — например, к стеклянной стенке аквариума или ко лбу заболевшего ребенка.

На самом деле пластина не представляет собой однородный кусок определенного полимера: она состоит из многих слоев и содержит удивительные соединения, которые называются жидкими кристаллами. Жидкий кристалл представляет собой нечто промежуточное между твердым телом и жидкостью. Позади каждой цифры на пластине нанесена капля специально разработанного жидкого кристалла, который отражает свет только при соответствующей температуре.

Чтобы лучше понять, что же такое жидкий кристалл, нам нужно вернуться к микроскопической структуре жидкостей и твердых веществ. Твердые кристаллы — это чрезвычайно упорядоченные структуры. Расстояния между атомами и молекулами кристалла, их взаимное расположение в пространстве настолько строго соблюдаются, что, зная расположение нескольких частиц, можно точно предсказать расположение миллионов им подобных. Эта упорядоченность носит название позиционного порядка, и кристалл, изображенный на рис. 7.5.3, имеет позиционный порядок. Кроме того, частицы в кристаллах имеют еще и высокую степень ориентации, поэтому, зная ориентацию нескольких частиц, вы можете предсказать, как будут ориентированы миллионы соседних. Этот вид упорядоченности называется ориентационным порядком. Кристалл на рис. 7.5.3 демонстрирует также и ориентационный порядок. В отличие от кристаллов, в обычных жидкостях нет ни позиционного, ни ориентационного порядка (см. рис. 7.5.4). Если вы знаете положение и ориентацию нескольких частиц жидкости, это почти ничего не скажет вам о положении и ориентации их соседей.

Как мы уже говорили, жидкие кристаллы занимают промежуточное положение между твердыми веществами и жидкостями. Как и у обычных жидкостей, у жидких кристаллов очень низкий позиционный порядок. Знание расположения нескольких частиц в жидком кристалле не поможет вам предсказать расположение соседних частиц. Зато жидкие кристаллы отличаются высокой степенью ориентационного порядка. Они состоят из молекул дисковидной или вытянутой стержнеобразной формы, которые связаны друг с другом, хотя эта структура может легко меняться (рис. 7.5.10). Благодаря тому, что молекулы мобильны, как в обычной жидкости, но при этом сохраняют высокую степень ориентации, как в твердых кристаллах, эти соединения и получили название жидких кристаллов.

Жидкие кристаллы очень часто встречаются в биологических системах. Например, из жидких кристаллов построены клеточные мембраны животных. Среди наиболее известных разновидностей жидких кристаллов — жемчужные, переливающиеся разными оттенками жидкие мыла и шампуни, которые стали популярными в последние годы. Их поразительные оптические свойства обусловлены исключительным ориентационным порядком. Жидкие кристаллы необычным образом взаимодействуют со светом, и эта особенность делает их незаменимыми для использования в дисплеях электронных часов и в компьютерных мониторах. Это же необычное свойство лежит в основе работы термометров на полимерных пленках.

Жидкий кристалл, который используется в термометре, устроен не так просто, как тот, что изображен на рис. 7.5.10. На рисунке показан нематический жидкий кристалл, молекулы которого могут быть расположены в любом месте материала, но при этом все они ориентированы примерно в одном направлении. В термометрах же используются хиральные нематические кристаллы, для которых характерен естественный изгиб, так что молекулы преимущественно ориентированы по спирали, чем-то напоминающей штопор, если смотреть на кристалл под определенным углом (рис. 7.5.11). Иными словами, у хирального нематического кристалла тоже имеется только ориентационный порядок, но этот ориентационный порядок представляет собой сложную спираль.



Рис. 7.5.9. В этом термометре на полимерной пластине размещены 12 различных жидких кристаллов, каждый из которых отражает свет в определенном, очень узком интервале температур. В данный момент жидкий кристалл, нанесенный позади отметки 74 °F (23 °C), интенсивно отражает свет, показывая, что температура в комнате близка к этому значению.

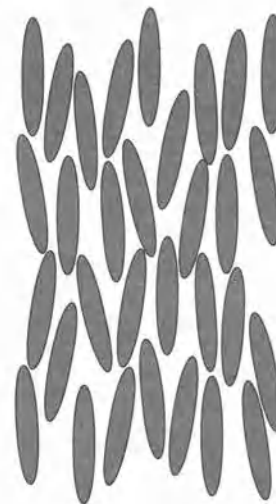


Рис. 7.5.10. Стержневидные или дисковидные молекулы в жидком кристалле не имеют позиционного порядка, но имеют ориентационный порядок. На этом рисунке все стержневидные молекулы смотрят примерно в одном направлении, что характерно для нематических жидких кристаллов.

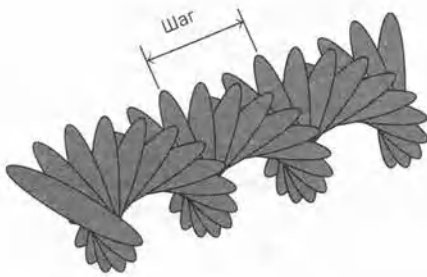


Рис. 7.5.11. Молекулы хирального нематического жидкого кристалла ориентированы в специфическую структуру, которую можно представить в виде спирали, закрученной вдоль одного направления через жидкость. Расстояние между соседними витками направленных вверх молекул называется шагом.

3 Некоторые насекомые обязаны своей необыкновенной окраской хиральным нематическим жидким кристаллам. Жидкие кристаллы содержат ориентированные молекулы, избирательно отражающие свет определенного цвета. В теле насекомого особые выделения, содержащие эти кристаллы, отвердевают, образуя твердые вещества, которые сохраняют как специфическую спиральную структуру, так и необычные оптические свойства жидких кристаллов.

Спиральная ориентация молекул придает хиральному нематическому жидкому кристаллу изогнутую, волнообразную форму. В его структуре даже имеются “гребни” — те места, где молекулы ориентированы вверх и вниз, но не в сторону. Расстояние между соседними гребнями называется шагом (то же слово используется для описания расстояния между соседними витками резьбы винта). Шаг хирального нематического жидкого кристалла отвечает за его необыкновенные оптические свойства.

Шаг этот может быть равен всего нескольким десятым долям нанометра — или многим микронам, в зависимости от химического состава кристалла и его температуры. При повышении температуры шаг укорачивается, что и позволяет жидкому кристаллу служить индикатором температуры. Для конкретного хирального нематического жидкого кристалла имеется только узкий диапазон температур, в котором шаг спирали равен длине волны видимого света в этой жидкости. Когда температура кристалла находится в этих пределах, он вдруг начинает отражать окрашенный свет!

Например, если при  $28\text{ }^{\circ}\text{C}$  шаг какого-то определенного жидкого кристалла равен длине волны синего света, то этот жидкий кристалл при освещении белым светом будет казаться ярко-синим, потому что будет отражать синие лучи в направлении ваших глаз. Если при  $26\text{ }^{\circ}\text{C}$  шаг станет больше и будет равен длине волны красного света, жидкость будет выглядеть красной. Если же при  $24\text{ }^{\circ}\text{C}$  шаг станет больше, чем длина волны любого видимого света, тогда жидкость начнет отражать инфракрасное излучение и будет казаться прозрачной. Это явление называется избирательным отражением. Оно обусловлено конструктивной интерференцией — свойством волн, которые мы рассмотрим в главе 14 (этот эффект также проявляется в природе, см. 3).

Итак, на пластиковую пластину термометра сзади наносится ряд хиральных нематических жидких кристаллов, и каждый из них виден через прозрачный просвет-цифру на непрозрачной пленке. Цифра обозначает температуру, при которой (и только при которой) отражает видимый свет находящийся за цифрой жидкий кристалл. Поскольку позади жидких кристаллов находится еще один слой черного пластика, цифры выглядят черными, пока кристаллы не начинают избирательно отражать свет. При каждой конкретной температуре только один тип жидких кристаллов избирательно отражает свет и высвечивает число, соответствующее температуре пластины.

## Электронные термометры и термостаты

В эпоху электронной революции цифровые термометры и термостаты постепенно вытесняют традиционные аналоговые устройства. Мы уже не хотим считывать показания со шкалы или вглядываться в столбик жидкости — нам подавай цифровой дисплей. Компьютер может без труда представить значение температуры в цифровой форме, управление котлом или духовкой на основании цифровых данных давно уже не проблема. Тем не менее компьютер по-прежнему нуждается в датчике, который измерял бы температуру в цифровой форме, чтобы затем эти данные можно было отразить на мониторе или ввести в блок управления отоплением. Наиболее распространенные электронные датчики температуры — это термодпары и терморезисторы (термисторы). Принципы работы этих устройств различны, но все они основаны на зависимости электронных свойств от температуры.

Действие термодпары основано на эффекте Зеебека (термоэлектрическом эффекте). Как я уже отмечал в разделе 7.1, главные переносчики тепла в металлах — это подвижные электроны, те самые, что ассоциируются с электропроводностью металла. Подвижные электроны на горячем конце металлического стержня обладают избыточной кинетической энергией и двигаются быстрее, чем их собратья на холодном конце. Как правило, подвижные электроны переносят тепло от горячего к холодному концу стержня. Дополнительная энергия, которой обладают электроны, покидая горячий конец стержня, помимо прочего, создает определенный дисбаланс электрических зарядов. В результате на холодном конце оказывается некоторое количество “лишних” электронов, в то время как на горячем их не хватает. Это перераспределение электрического заряда и называется эффектом Зеебека.

Несмотря на то, что этот дисбаланс зарядов чрезвычайно мал, его можно измерить чувствительными электронными приборами. Однако измерить разницу зарядов между холодным металлом и горячим металлом не так просто. Гораздо легче произвести аналогичное измерение для двух металлов, имеющих одинаковую температуру. Для этого создается термопара: два проводника, изготовленные из разных металлов, соединяются вместе. Когда место соединения (контакт) нагревают, каждый проводник испытывает эффект Зеебека, но величина дисбаланса заряда разная для разных металлов и зависит от конкретного металла.

Поскольку электроны могут свободно проходить через нагретый контакт, различные дисбалансы зарядов в каждом проводнике создают общий дисбаланс между двумя их холодными концами. Например, один из видов стандартных термопар получают при соединении платиновой проволоки с проводником из сплава платины и родия. При нагревании контакта между проводниками поток электронов устремляется от места контакта в обоих направлениях, но больше электронов идет по платиновой проволоке, чем по проводу из платино-родиевого сплава. В результате на холодном (комнатной температуры) конце платинового проводника сосредоточивается больше электронов, чем на аналогичном конце платино-родиевого. Измерить же разницу в зарядах между двумя проводниками при комнатной температуре относительно легко.

Термопары часто устанавливают в блоки управления температурой печей, котлов и технологического оборудования. Они с легкостью могут измерять очень высокие температуры (такие как в доменной печи). Термопары также могут измерять и очень низкие температуры, потому что эффект Зеебека работает и в обратном направлении — если вы сделаете место контакта более холодным, чем свободные концы термопары. Какие именно металлы использовать в термопаре, зависит от диапазона температур и химического состава среды, в которой предстоит работать устройству. Платина и родий — в высшей степени инертные металлы, способные выстоять в практически любой агрессивной среде при температуре вплоть до 1769 °С — температуры плавления платины. Но, к сожалению, оба эти металла чрезвычайно дороги. Среди более дешевых материалов для термопар — железо, медь и разнообразные сплавы меди, никеля, хрома и алюминия.

Терморезисторы (термисторы) довольно сильно отличаются от термопар. Они измеряют температуру, изменяя собственную электропроводность. Терморезисторы изготавливают из полупроводников — материалов, которые, с одной стороны, не так хорошо проводят электричество, как металлы, но и не являются такими хорошими изоляторами, как стекло и пластмассы. Подробно мы обсудим полупроводники в главе 12, а то, что нам необходимо знать уже сейчас, можно достаточно легко объяснить.

Истинный полупроводник при очень низких температурах совсем не имеет подвижных электронов и ведет себя как изолятор. В отсутствие подвижных электронов полупроводник, естественно, не может проводить электрический ток. Однако при нагревании полупроводник внезапно перестает быть хорошим изолятором, ведь тепловая энергия влияет не только на атомы и молекулы полупроводника, но также и на его электроны. Когда температура повышается, электроны освобождаются от удерживающих их сил, перемещаются внутри вещества и полупроводник начинает проводить электричество. При высоких температурах он делает это достаточно хорошо.

С помощью электроники, которая измеряет электропроводность, полупроводники могут служить отличными измерителями температуры. Терморезисторы, предназначенные, в частности, для электронных медицинских термометров, работают на основе специализированных полупроводников, целенаправленно разработанных в расчете на определенные диапазоны измеряемых температур: их сопротивление резко меняется именно в этих диапазонах. Хорошие терморезисторы очень точны в значительном температурном диапазоне, а некоторые из них могут даже измерять температуры, близкие к абсолютному нулю. Однако их нельзя использовать для определения очень высоких температур — просто потому, что полупроводниковые кристаллы далеко не так выносливы, как металлы, из которых делают термопары.



**Рис. 7.5.12.** Этот оптический термометр фиксирует тепловое излучение поверхности и использует его интенсивность для определения температуры этой поверхности. Предполагается, что поверхность имеет высокую излучательную способность. Однако прибор можно приспособить к использованию и при других значениях коэффициента излучения. Термометр проецирует лазерное кольцо, чтобы обозначить границы поверхности измерения.

В этой главе я так часто упоминал о тепловом излучении, что вы, должно быть, предчувствовали, что рано или поздно я снова заговорю об этом — на этот раз в связи с термометрами. Что ж, этот момент настал! Оптические термометры фиксируют тепловое излучение объекта и используют его для определения температуры этого объекта. Их очень часто можно увидеть в кабинетах врачей: чтобы измерить температуру тела, достаточно всего на пару секунд засунуть такой термометр в ухо пациента. Кроме того, оптические термометры широко применяют в промышленности, в сфере обслуживания и даже в быту: ведь они могут измерять температуру двигателей, различной техники и чуть ли не всего остального на расстоянии и без непосредственного контакта с объектом.

Оптический термометр (рис. 7.5.12) снабжен системой линз, которая улавливает тепловое излучение, поступающее на нее из достаточно узкого диапазона углов. Если направить эту систему на определенный объект, то на нее упадет тепловое излучение этого объекта. Подробно анализировать полный спектр теплового излучения — слишком сложная (и совершенно излишняя для недорогого устройства) задача, поэтому обычно производится простое измерение интенсивности излучения в выбранном диапазоне инфракрасного спектра. Этого вполне достаточно, чтобы определить температуру объекта с удовлетворительной точностью.

Хотя возможность измерять температуру почти мгновенно, да еще и на расстоянии, — это прекрасно, оптические термометры имеют свои недостатки. Они не могут отличить собственное тепловое излучение объекта от любого другого теплового излучения, которое этот объект отражает или пропускает. Поэтому лучше всего термометр работает, если исследуемое тело — черное в наблюдаемой части спектра. Если тело в этой части спектра отражает излучение или является прозрачным, показания термометра могут быть неверными.

Медицинские оптические термометры имеют достаточно высокую точность, потому что ушной канал близок к идеально черному телу. При попадании в ушной канал свет многократно преломляется и в основном поглощается. Обратного излучения из уха практически не происходит. Поскольку ушной канал почти идеально поглощает свет, он так же идеально излучает тепло. Характеристики этого теплового излучения зависят от температуры тела. Внутри ушного канала оптический термометр “видит” тепловое излучение, которое соответствует температуре вашего тела в данный момент.

Но когда вы используете оптический термометр для измерения температуры поверхности, нужно учитывать излучательную способность этой поверхности. Если она не черная, может оказаться, что вы измеряете не ее собственную температуру, а температуру отраженного или пропущенного через нее теплового излучения. При нормальной температуре коэффициент излучения телесного тепла через кожу составляет примерно 0,98, поэтому измерение температуры при помощи оптического термометра практически гарантирует от ошибок.

Тепловизионная камера, или тепловизор, — прибор, который фиксирует тепловое излучение в инфракрасной, а не в видимой области спектра. Он может составить точную температурную карту тела, потому что в инфракрасной области спектра кожа является почти абсолютно черным телом. Тепловизионные изображения широко применяются в медицинской диагностике, так как горячие и холодные участки на коже могут служить индикатором состояния здоровья человека.

Большинство органических материалов — ткани, краски, стекло, керамика — при комнатной температуре также ведут себя почти как абсолютно черные для теплового излучения тела. Их коэффициенты излучения превышают 0,90, поэтому можно измерять их температуру оптическим методом, не опасаясь большой ошибки. Но если вы измеряете температуру металла, нужно быть начеку: металлы имеют высокие коэффициенты излучения при комнатной температуре лишь в том случае, если они сильно окислены. В остальных случаях они не испускают достаточное количество собственного теплового излучения и вы можете принять за собственную температуру металла температуру отраженного теплового излучения. В этом случае вам лучше измерять температуру в какой-нибудь полости в металле, где благодаря многократному отражению коэффициент излу-



чения приближается к 1. И никогда не пытайтесь измерить температуру холодного тела, которое находится под воздействием излучения более горячего тела; даже слабое отражение этого интенсивного теплового свечения обманет оптический термометр, и он покажет завышенную величину.

## Какие проблемы могут быть связаны с тепловым расширением

Тепловое расширение жидкостей редко вызывает проблемы, потому что жидкость, в отличие от твердого тела, не может деформироваться (однако почитайте ❶). Различия в коэффициентах объемного расширения или в скорости, с которой нагреваются или охлаждаются различные части одного и того же устройства, могут повлечь повреждения. Коэффициент объемного расширения бетонной балки железнодорожного моста не таков, как у стальных рельсов или грунта, на котором установлены опоры. Требуются очень тщательные расчеты, чтобы бетон не покрылся трещинами, опоры не покосились, а рельсы не сплелись в стальные спагетти.

Чтобы предотвратить потенциальную катастрофу, в каждом конкретном случае используются особые способы соединения. Бетонные конструкции состояются из отдельных блоков, которые соединяются эластичными материалами, так что балки могут расширяться или сжиматься, не деформируясь и не разрушаясь. На дорожном полотне автомобильного моста оставляют специальные компенсационные зазоры, чтобы температурные изменения длины моста не повредили асфальт.

Между стыками рельсов также имеются компенсационные зазоры, которые позволяют каждому рельсу безопасно расширяться и снова сжиматься.

Даже если предмет изготовлен только из одного материала, он может быть поврежден неравномерным тепловым воздействием. Металлическая кастрюля может погнуться и искривиться, если вы неудачно поставите ее на плиту или в духовку, потому что неравномерный нагрев приводит к неравномерному расширению различных частей кастрюли, и лишь пластичность металла не дает ему лопнуть.

Стекло не обладает пластичностью, поэтому оно особенно чувствительно к термическим повреждениям. Как показано в таблице 7.5.1, обычное стекло имеет большой коэффициент объемного расширения, поэтому при неравномерном нагреве оно лопается — твердый, хрупкий материал буквально разрывается на части. Одним из наиболее важных событий в технологии стекольной промышленности в прошлом веке стало изобретение термостойкого стекла, которое очень мало расширяется при нагревании. Термостойкие стекла имеют относительно небольшой коэффициент объемного теплового расширения, поэтому спокойно выдерживают достаточно неоднородную температуру. Большая часть используемой для приготовления пищи стеклянной посуды производится из такого стекла.

Но даже посуда из термостойкого стекла лопнет, если вы поставите ее на открытую спираль электроплитки или перенесете из горячей духовки под струю холодной воды. Чтобы выдержать столь резкие перепады температур или очень неоднородное нагревание, кухонная посуда должна иметь чрезвычайно низкий коэффициент объемного расширения, она должна быть изготовлена из кварцевого стекла или стеклокерамики. Несмотря на то что изделия из стеклокерамики или кварцевого стекла дороже, чем из термостойкого, они настолько прочны и устойчивы к тепловому воздействию, что эти материалы часто используют в качестве варочных поверхностей современных электрических плит. Из них даже изготавливают кастрюли и сотейники. Хотя кастрюли из кварцевого стекла или стеклокерамики плохо проводят тепло и, следовательно, необязательно будут равномерно прогревать пищу, они смогут выдержать огромные тепловые и механические нагрузки, не ломаясь и не разбиваясь.

❶ Тепловое расширение жидкостей может представлять проблему для герметичных пищевых контейнеров. Если запечатанные бутылки, стеклянные или консервные банки наполнены доверху, то при повышении температуры они могут лопнуть или прохудиться. Это происходит потому, что жидкость внутри контейнера расширяется быстрее, чем твердый материал, из которого он сделан. Поэтому в большинстве контейнеров для пищевых продуктов предусмотрены небольшие воздушные или вакуумные пространства. Так как домашние консервы, как правило, запечатывают при высоких температурах, пустое пространство между крышкой и продуктами образуется само по мере охлаждения банки или бутылки.



## ГЛАВА 8

# ГДЕ И КАК РАБОТАЕТ ТЕПЛО

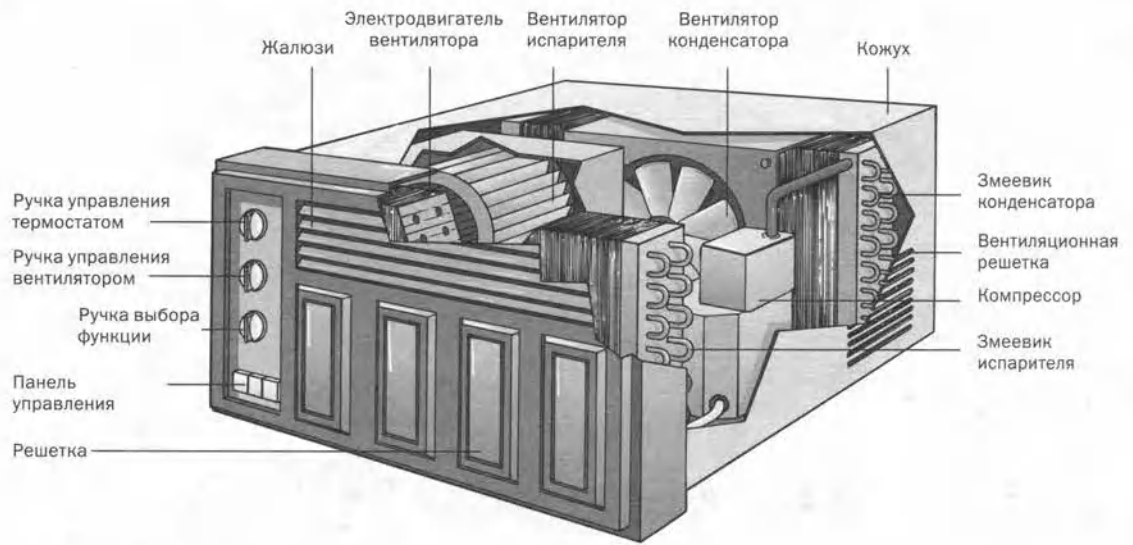
**К**ак мы уже знаем, тепло обычно переходит от более горячего тела к более холодному — вот почему горячее солнце согревает вашу кожу, когда вы жаритесь на пляже, а холодный зимний ветер остужает ее, когда вы несетесь с горы на санках. Но вовсе не всегда в природе тепло перетекает пассивно, и в мире наших технологий тоже есть немало устройств, которые активно переносят тепло от холодных объектов к горячим или используют тепловой поток для совершения полезной работы. В этой главе мы рассмотрим законы, управляющие превращениями тепла, — область физики, которую называют термодинамикой.

Однако в более широком смысле термодинамика занимается взаимоотношениями порядка и беспорядка. О да, у физики тоже есть собственная версия сериала “Закон и порядок”, и сюжеты его эпизодов крутятся вокруг неумолимого и безостановочного убывания порядка, которое царит в нашей Вселенной и определяет многие аспекты нашей жизни. Как я покажу на разнообразных примерах, порядок гораздо легче превратить в беспорядок, чем наоборот.

Естественное отсутствие порядка в большинстве систем позволяет вам, например, просмотрев множество фотографий, разложить их затем в хронологическом порядке. Чем больше беспорядка вы видите на очередной фотографии, тем позже она сделана (это безусловно относится к подавляющему числу фотографий всяческих праздников и вечерипок — по крайней мере до тех пор, пока кто-нибудь не взялся за уборку и в буквальном смысле слова не выкинул прочь беспорядок вместе с мусором). Однако беспорядок можно переместить, но нельзя заставить его полностью исчезнуть.

В нашем мире нет недостатка в энергии; тепловая энергия имеется везде, куда ни посмотришь. А вот чего не хватает, так это порядка. К счастью, пока мы существуем на нашей планете, Солнце поставляет и будет поставлять нам свежие и возобновляемые порции порядка. Но чему мы должны в ближайшее время научиться, так это тому, как эффективно использовать этот порядок, как стать более осторожными и бережливыми в потреблении бесценных запасов порядка, уже созданных на земле, — минеральных богатств в недрах планеты, животного и растительного мира на суше и в воде. Этот существующий порядок должен сохраняться как можно дольше. Если он исчезнет, мы вряд ли справимся с беспорядком.

- 268 **8.1 Кондиционеры**  
*Как кондиционер отводит тепло из вашего дома.*
  
- 276 **8.2 Автомобили**  
*Как автомобили используют тепло от сжигания топлива для движения.*
  
- 293 **8.3 Атмосфера**  
*Как солнечный свет и воздух порождают ветер и непогоду.*
  
- 302 **8.4 Очистка воды**  
*Как с помощью простых процессов можно удалить соли из воды.*



## 8.1 Кондиционеры

В жаркий летний день вы озабочены вовсе не тем, чтобы сохранить тепло, — вы жаждете сохранить прохладу. И вместо того чтобы подкинуть дровишек в печь, вы включаете кондиционер — устройство, которое охлаждает воздух в помещении, удаляя из воздуха часть его тепловой энергии. Но кондиционеры не могут заставить тепловую энергию исчезнуть. Нет, они просто передают ее от более холодного воздуха в комнате более горячему наружному воздуху. Так как кондиционер передает энергию в направлении, противоположном естественному потоку тепла, это устройство представляет собой тепловой насос, а заодно может служить классическим примером действия законов термодинамики.

### Перенос тепла: термодинамика

В знойный летний день в вашем доме становится жарко и душно. Тепло с улицы затапливает вашу комнату и перестает это делать, только когда внутри становится так же жарко, как снаружи. Вы можете облегчить свое положение, удалив часть этой тепловой энергии. Мы уже знаем, как добавить тепловую энергию, но пока еще не знаем, как ее удалить. До настоящего момента мы говорили только об одном способе охлаждения: передаче тепла к более холодному телу. Но если у вас поблизости нет ледяной хижины, вам нужен какой-то другой способ избавиться от тепловой энергии. Вам нужен кондиционер.

Этот прибор передает тепло в направлении, противоположном естественному. Тепло перетекает от более холодного комнатного воздуха к более горячему наружному, то есть у вас в комнате становится прохладнее, в то время как наружный воздух становится еще жарче. За передачу тепла “против течения” приходится платить: кондиционеру требуется упорядоченная энергия, поэтому, как правило, для этих устройств характерно высокое потребление электроэнергии. Итак, кондиционер является разновидностью теплового насоса — устройства, которое использует упорядоченную энергию для передачи тепла от холодного тела к теплomu, против течения естественных тепловых потоков.

Прежде чем начать разбираться в том, как же именно кондиционер перекачивает тепло, мы должны сперва убедиться, что это перекачивание необходимо. Когда речь заходит об охлаждении вашего дома, то может показаться, что, помимо кондиционирования, есть не так уж мало разумных (на первый взгляд) альтернативных способов. Вот вам три из них:

- 1 позволить теплу перейти из вашего дома в дом соседа;
- 2 уничтожить часть тепловой энергии вашего дома;
- 3 превратить часть тепловой энергии в электрическую.

К сожалению, все эти три варианта невыполнимы. Тем не менее будет полезно рассмотреть их более подробно, потому что таким образом мы узнаем, какие законы термодинамики регулируют движение тепловой энергии.

Первый вариант затрагивает интересную тему. Ваш дом находится в тепловом равновесии с наружным воздухом, то есть между ними нет движения тепла и оба имеют одинаковую температуру. Дом вашего соседа также находится в тепловом равновесии с окружающим воздухом. Что произойдет, если вы установите теплообмен между своим домом и соседним? Ничего. Поскольку оба дома одновременно пребывают в тепловом равновесии с наружным воздухом, они также находятся в тепловом равновесии друг с другом. Все три пространства имеют одинаковую температуру.

Данный пример иллюстрирует нулевое начало термодинамики, которое гласит, что если каждое из двух тел находится в термодинамическом равновесии с третьим телом, то они также находятся в термодинамическом равновесии друг с другом. Этот кажущийся самоочевидным закон раскрывает смысл понятия “температура”. Если у вас в комнате при температуре 35 °C имеется множество объектов и одни из них находятся между собой в состоянии теплового равновесия, а другие нет, то тогда слова “при температуре 35 °C” мало что значат. Однако каждый объект, имеющий температуру 35 °C, находится в тепловом равновесии с другими объектами, имеющими такую же температуру. Как показывают наблюдения, в природе нулевой закон термодинамики выполняется, стало быть, понятие температуры имеет смысл. И поскольку дом вашего соседа имеет такую же температуру, как и ваш, сосед может спать спокойно: вы не можете отправить ему дополнительное тепло.

---

### **Нулевой закон термодинамики**

Два тела, находящиеся в состоянии теплового равновесия с третьим телом, находятся в тепловом равновесии друг с другом.

---

Второй альтернативный вариант, честно говоря, с самого начала казался нам неправдоподобным. Еще с первой главы мы помним, что у энергии есть важная особенность — она представляет собой сохраняющуюся величину. Вы не можете охладить дом, уничтожив тепловую энергию, поскольку энергия не может быть уничтожена. Чтобы избавиться от тепловой энергии, вы должны преобразовать ее в другой вид энергии или переместить куда-нибудь в другое место.

Этот принцип сохранения энергии служит основой для первого закона термодинамики: изменение внутренней энергии неподвижного тела равно количеству сообщенной телу теплоты минус работа, совершенная над внешними телами. Внутренняя энергия тела равна сумме его тепловой энергии и любой запасенной внутри него дополнительной потенциальной энергии. Закон утверждает, что тепло, сообщаемое телу, увеличивает его внутреннюю энергию, в то время как работа, выполняемая телом, уменьшает его внутреннюю энергию. Другими словами, поскольку энергия сохраняется, постольку внутреннюю энергию можно изменить только передачей энергии в виде тепла или работы. Первый закон термодинамики можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} \text{изменение внутренней энергии тела} = \\ = \text{тепло, сообщенное телу} - \text{работа, выполненная телом} \end{aligned} \quad (8.1.1).$$

---

### **Первый закон термодинамики**

Изменение внутренней энергии неподвижного тела равно количеству теплоты, сообщенной телу, минус работа, которую это тело выполняет над внешними телами.

---

## **Беспорядок, энтропия и второй закон термодинамики**

---

Последний из трех альтернативных вариантов на первый взгляд кажется куда более многообещающим, чем первые два. Действительно, по-видимому, нет ничего сложного в том, чтобы преобразовать тепловую энергию в электрическую (или какой-то другой упорядоченный вид энергии). Потом ее можно было бы перепродать электрической компании и уменьшить свои счета за электроэнергию... Разве это не замечательно?

Но тут возникает проблема. Упорядоченная энергия и тепловая энергия отнюдь не эквивалентны. Можно легко превратить упорядоченную энергию в тепловую, но обратное превращение значительно сложнее. Например, вы можете сжечь поленья, чтобы преобразовать его химическую потенциальную энергию в тепловую, но вам придется туго, если вы решите обратить эту тепловую энергию обратно в химическую потенциальную и попытаетесь восстановить поленья.

Основные законы движения на сей счет молчат. Дело не в том, что в дыме не хватает энергии, чтобы воссоздать поленья. Это значит, что отдельные частицы дыма должны объединить свои тепловые энергии, чтобы выполнить эту “обратную сборку”, — событие абсолютно невероятное. Представить себе, что все частицы поведут себя именно таким образом, чтобы дымовые газы превратились обратно в дерево и кислород, совершенно невозможно — это было бы невысказанное совпадение, которое просто никогда не сможет произойти. Так и в примере с вашим домом — все частицы воздуха должны объединить усилия, чтобы превратить свою тепловую энергию в электрическую. Но поскольку такое скоординированное поведение частиц совершенно невозможно, в ближайшем будущем вам не удастся перепродать электроэнергию энергетической компании.

После того как энергия случайным образом распределилась в воздухе среди отдельных частиц, вы не можете вновь собрать эту энергию вместе. Создать беспорядок из порядка легко, но восстановить порядок из беспорядка почти невозможно. В результате системы, которые поначалу были упорядоченными, постепенно становятся все более и более хаотическими — и никогда наоборот. Лучшее, на что они способны, — какое-то время сохранять неизменную степень беспорядка. Отсюда мы можем сделать вывод, что беспорядок, точнее, степень неупорядоченности изолированной системы никогда не уменьшается.

Этот постулат о никогда не уменьшающемся беспорядке лежит в основе термодинамики. Существует даже мера беспорядка в системе — энтропия. Все виды неупорядоченности вносят свой вклад в энтропию системы, включая его тепловую энергию и структурные дефекты. Разбить окно или нагреть его — оба этих действия увеличивают энтропию. Несмотря на то, что слово “энтропия” звучит довольно похоже на слово “энергия”, не путайте эти два понятия. Энергия — сохраняющаяся величина, в то время как энтропия может расти (и она, как правило, растет). Энтропию легко увеличить.

Поскольку беспорядок никогда не уменьшается, то и третий альтернативный вариант охлаждения невозможен. Превращение тепловой энергии вашего дома в электрическую уменьшило бы степень беспорядка и снизило бы энтропию. Но на этом наши наблюдения над энтропией не заканчиваются. Существует один способ уменьшить энтропию вашего дома — отправить ее куда-нибудь еще. Собственно говоря, вы удаляете энтропию из дома всякий раз, когда выносите мусор, хотя это действие также изменяет содержимое вашего дома. Но вы можете снизить энтропию и без того, чтобы выносить из дома какие-либо предметы, — для этого достаточно передать куда-нибудь тепло. Тепло представляет собой носитель беспорядка и, соответственно, энтропии, поэтому, избавляясь от тепла, вы заодно избавляетесь от энтропии.

Постулат, что энтропия никогда не уменьшается, несколько дискредитируется соображением, что всегда существует возможность обмена теплом (и энтропией) между телами. Так что прежде чем утверждать, что энтропия тела или системы тел не может уменьшаться, мы должны убедиться, что эта система термически изолирована от окружающей среды и не может передавать свою энтропию вовне. Если это условие соблюдается, мы можем смело утверждать: энтропия термически изолированной системы никогда не уменьшается. Это и есть второй закон термодинамики.

---

### **Второй закон термодинамики**

Энтропия термически изолированной системы никогда не уменьшается.

---

Из второго закона термодинамики следует, что единственный способ охладить ваш дом — это вывести куда-нибудь тепловую энергию и энтропию. Такой перенос не составил бы труда, если бы у вас под рукой был какой-нибудь холодный объект, готовый принять это тепло. Но в отсутствие таких холодных объектов вам при-

дется использовать кондиционер. Как и все тепловые насосы, кондиционер удаляет тепло и энтропию, не нарушая при этом второго закона термодинамики: энтропия каждой отдельно взятой термически изолированной системы не уменьшается. Как мы убедимся, кондиционер понижает энтропию у вас в доме, но увеличивает энтропию наружного воздуха; более того, мировая энтропия при этом тоже возрастает.

Существует предел того, сколько энтропии кондиционер может вывести из вашего дома. Перенося наружу тепловую энергию и энтропию, кондиционер понижает температуру в ваших комнатах. Теоретически температура в конце концов может опуститься до абсолютного нуля и всякое тепловое движение прекратится. Когда это произойдет, энтропия тоже будет равна нулю. Подобная взаимосвязь между абсолютной температурой и энтропией описывается третьим законом термодинамики: когда температура тела приближается к абсолютному нулю, его энтропия также стремится к нулю. Третий закон постулирует, что абсолютный нуль — конечное состояние, в котором не остается никакого беспорядка, в то время как второй закон провозглашает невозможность полного удаления беспорядка из тела. Но так как абсолютный нуль недостижим, третий закон говорит о “стремлении”, но не о “достижении”.

---

### **Третий закон термодинамики**

Когда температура тела приближается к абсолютному нулю, его энтропия также стремится к нулю.

---

## **Перераспределение тепла против естественного направления потока**

---

Хотя второй закон термодинамики не позволяет энтропии термически изолированной системы уменьшаться, он позволяет телам в этой системе перераспределять энтропию между собой. Энтропия одного тела может понижаться, пока энтропия остальных составных частей системы будет хотя бы настолько же возрастать. Подобное перераспределение энтропии позволяет одной части системы становиться холоднее, тогда как другая ее часть становится теплее.

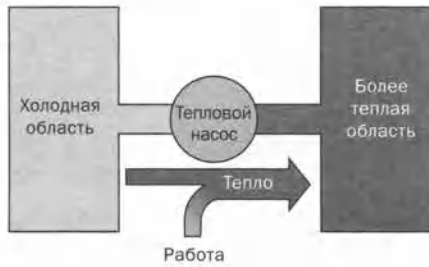
Предположим, что позади вашего дома имеется пруд с холодной водой. Вы пропускаете воду из этого пруда по трубам через вашу ванную, при этом вода уносит часть тепла из нагретого воздуха внутри вашего дома. Дом становится прохладнее, вода в пруду — теплее. Такая передача тепла от горячего воздуха в вашем доме холодной воде в пруду соответствует второму закону термодинамики. Энтропия объединенной системы — дома и пруда — не уменьшается. Более того, фактически она увеличивается!

Увеличение энтропии происходит из-за того, что тепло вносит больше беспорядка в холодные тела, чем в горячие. То есть каждый джоуль тепла, который перешел из дома в пруд, создает больше беспорядка в пруду, чем он создавал порядка в доме.

В качестве иллюстрации давайте представим себе, что одновременно происходят два праздника: ежегодное чаепитие общества садоводов и день рождения четырехлетнего малыша, на которое явились гости соответствующего возраста. Пусть чинное чаепитие будет аналогом холодного пруда, в то время как суматошный, беспорядочный детский праздник символизирует теплый дом. Перетекание тепла из теплого дома в холодный пруд аналогично тому, как если бы один из маленьких непосед с детского праздника поменялся местами со степенной восьмидесятилетней любительницей цветов. Такой обмен, вероятно, слегка (но не слишком) уменьшил бы беспорядочность детского дня рождения, зато внес бы чрезвычайно много беспорядка в чаепитие. Число участников каждого мероприятия осталось бы неизменным, но суммарный беспорядок вырос.

Когда тепло перетекает из вашего дома в пруд, суммарная энтропия возрастает, что полностью соответствует второму закону. Подобное увеличение энтропии происходит во всех случаях, когда тепло передается от горячего тела к холодному, именно поэтому тепло обычно переходит именно в таком направлении.

Но кондиционер совершает то, что кажется невозможным: он передает тепло от более холодного объекта (воздуха в вашем доме) к более горячему — наружному воздуху. Поток тепла идет в направлении, противоположном естественному,



**Рис. 8.1.1.** Тепловой насос переносит тепло из холодной области в более теплую. При этом он преобразует некоторую работу (упорядоченную энергию) в тепло (неупорядоченную тепловую энергию теплой области). Чем больше разница температур между двумя областями, тем больше работы требуется, чтобы перенести каждый джоуль тепла.

и беспорядок, который при этом вносится в наружный воздух, меньше, чем тот беспорядок, который кондиционер унес из вашего дома, остудив воздух в комнатах. Получается то же самое, как если бы вы вернули малыша с чинного чаепития обратно на день рождения, а пожилую любительницу цветов вновь отправили на чаепитие, — детскому празднику добавится еще чуть-чуть беспорядочности, в то время как чаепитие садоводов станет гораздо более упорядоченным. Иными словами, суммарный беспорядок двух мероприятий существенно уменьшится. Аналогичным образом, если в процессе не произойдет никаких изменений, кондиционер передаст тепло от более холодного внутреннего воздуха более горячему наружному, то есть энтропия объединенной системы уменьшится... Значит, второй закон термодинамики будет нарушен?

Однако мы в своих рассуждениях упустили важную деталь: кондиционер потребляет электроэнергию. Именно эту упорядоченную энергию кондиционер превращает в тепловую, а затем передает последнюю в виде дополнительного тепла наружному воздуху (**рис. 8.1.1**). При этом кондиционер создает достаточно энтропии, чтобы суммарная энтропия системы возрастала. Так что в конце концов второй закон термодинамики все-таки не нарушается.

Количество потребляемой кондиционером электроэнергии зависит от разницы температур внутри помещения и снаружи. Если эта разница невелика, то перенос тепла лишь слегка уменьшает энтропию, поэтому кондиционеру не нужно превращать большое количество упорядоченной энергии в тепловую. Но если разница температур велика, кондиционер должен создать много дополнительной энтропии, чтобы уравновесить ее потерю при теплопередаче.

Постулат, что энтропия не может уменьшаться, объясняет, почему кондиционер работает тем лучше, чем меньше ему предстоит охладить помещение. Чем больше разница температур между внутренним и наружным воздухом, тем больше электроэнергии или других форм работы кондиционер должен потратить, чтобы перенести каждый джоуль тепла. Для идеально эффективного кондиционера (или другого теплового насоса) соотношения между совершенной работой, количеством теплоты, отведенной от холодного тела, и количеством теплоты, подведенной к горячему телу, равны:

$$\begin{aligned} \text{количество теплоты, отведенной от холодного тела} &= \\ &= \text{совершенная работа} \times \frac{\text{температура}_{\text{хол}}}{\text{температура}_{\text{гор}} - \text{температура}_{\text{хол}}} \\ \text{количество теплоты, подведенной к горячему телу} &= \\ &= \text{количество теплоты, отведенной от холодного тела} + \text{совершенная работа} \end{aligned} \quad (8.1.2)$$

Более горячее тело получает не только тепло, отведенное от холодного тела, но также количество тепла, равное работе, совершенной при передаче. Заметим также, что работа, необходимая для отведения тепла от вашего дома, стремится к бесконечности, когда его температура стремится к абсолютному нулю; поэтому абсолютный нуль недостижим.

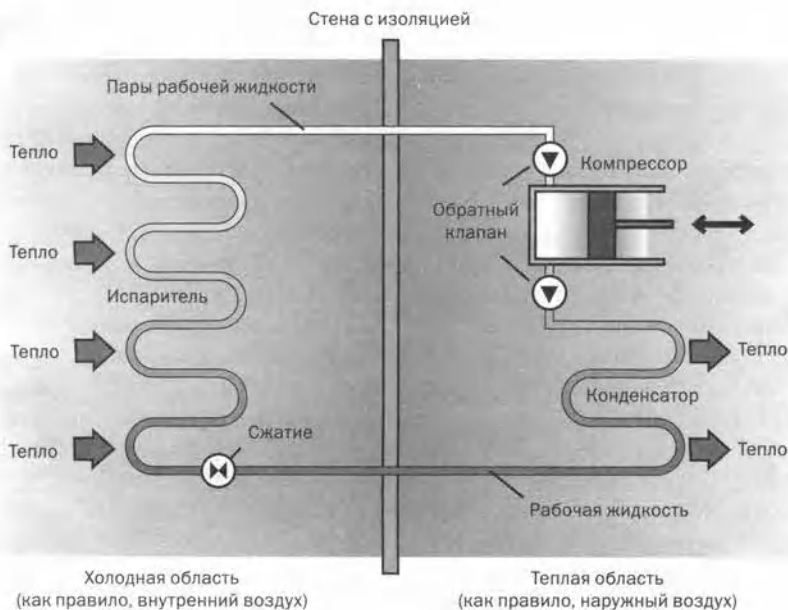
Как ни печально, в реальности кондиционеры никогда не бывают идеально эффективными, поэтому они переносят меньше тепла, чем следовало бы по уравнению 8.1.1. Хуже того, тепло постоянно вновь просачивается в дом со скоростью, которая примерно пропорциональна разности температур. Ничего удивительного, что наши счета за электричество взлетают до небес, когда мы выставляем на пульте кондиционера слишком низкую температуру!

## Как кондиционер охлаждает воздух

Определив, какую задачу должен решить для нас кондиционер, давайте проверим, как же реальный прибор с ней справляется. В большинстве случаев для передачи тепла от более холодного внутреннего к более горячему наружному воздуху используется жидкость. Ее называют рабочей жидкостью, она поглощает тепло внутреннего воздуха и высвобождает его в наружный.

Рабочая жидкость движется по замкнутому контуру через три основных узла кондиционера: испаритель, конденсатор и компрессор (**рис. 8.1.2**). Испаритель располагается внутри помещения, и именно он передает тепло от внутреннего





**Рис. 8.1.2.** Типичный воздушный кондиционер передает тепло от внутреннего холодного воздуха теплomu наружному воздуху. Жидкость испаряется в потоке внутреннего воздуха с последующей конденсацией этого пара в жидкость в потоке наружного воздуха. Рабочая жидкость переносит тепло, бесконечно циркулируя по замкнутому герметичному контуру. Перед испарителем она проходит через сжимающее устройство (капилляр), ее давление падает, и она начинает испаряться, поглощая при этом тепло от внутреннего воздуха. Затем рабочая жидкость в виде газа низкого давления поступает в расположенный снаружи компрессор, который совершает работу над газом и повышает его давление. После этого рабочая жидкость в виде газа высокого давления поступает в конденсатор, где начинает снова превращаться в жидкость, отдавая при этом тепло наружному воздуху. Далее жидкость высокого давления подается в капилляр, затем в испаритель, и цикл повторяется. Компрессор обеспечивает поступление упорядоченной энергии, которая необходима для переноса тепла из холодной области в теплую. Работа компрессора преобразуется в тепловую энергию и передается наружному воздуху в виде тепла.

воздуха рабочей жидкости (рис. 8.1.3). Конденсатор расположен снаружи здания, он передает тепло от рабочей жидкости в наружный воздух. Компрессор также расположен снаружи: он сжимает рабочую жидкость и совершает работу, необходимую для того, чтобы направить поток тепла против его естественного направления. Чтобы понять, как эти три компонента теплового насоса выкачивают тепло из вашего дома, рассмотрим их по отдельности.

Начнем с испарителя, в котором длинная металлическая трубка с рабочей жидкостью проходит через ряд перпендикулярных ей теплообменных пластин. Испаритель играет роль теплообменника, который переносит тепло от окружающего его теплого воздуха к холодной рабочей жидкости, а металлические пластины предоставляют дополнительную поверхность для теплообмена. Вентилятор нагнетает поток воздуха на пластины, и тепло быстро переходит в рабочую жидкость.

В полном соответствии со своим названием, испаритель позволяет рабочей жидкости испаряться. Вот почему рабочая жидкость становится такой холодной и поглощает так много тепла: как и любому веществу при испарении, жидкости, чтобы разорвать связи между молекулами и превратиться в газ, нужно получить скрытую теплоту парообразования. Рабочая жидкость забирает ее из своей соб-



**Рис. 8.1.3.** Испаритель этой установки центрального кондиционирования извлекает тепло из внутреннего воздуха помещения. Это тепло переносится наружу, где компрессор и конденсатор передают его наружному воздуху.

ственной тепловой энергии, поэтому температура жидкости падает, после чего тепло снова поступает в нее через теплообменные пластины и стенки трубки испарителя. К тому моменту, когда пар, в который превратилась рабочая жидкость, выходит из испарителя, он содержит значительную часть тепловой энергии внутреннего воздуха и уносит ее с собой в виде химической потенциальной энергии.

Чтобы заставить рабочую жидкость испариться, кондиционер резко снижает давление в ней. Как вы помните из главы 7, фазовые превращения, в том числе испарение, зависят от соотношения “взлетов” и “посадок” молекул вещества. Когда в трубке одновременно присутствуют и жидкость, и газ, молекулы постоянно переходят из жидкости в газ, а из газа — в жидкость. Если больше “взлетов”, жидкость испаряется, образуется стабильный газ. Если преобладают “посадки”, газ конденсируется с образованием стабильной жидкости. А если эти два процесса уравниваются друг друга, жидкость и газ сосуществуют в состоянии фазового равновесия.

Когда рабочая жидкость по трубке подходит к испарителю, она стабильна и имеет высокое давление. Если до этого часть рабочей жидкости и была в газообразном состоянии, то при подобном давлении она имеет такую высокую плотность, что “посадки” молекул преобладают над “взлетами” и газ в любом случае конденсируется. Поэтому к испарителю подходит только жидкость высокого давления, без пара. Но перед самым входом в испаритель рабочая жидкость проходит через узкое “горлышко” (капилляр), и ее давление резко падает. Жидкость низкого давления уже не так стабильна. При низком давлении ее пары настолько разрежены, что “взлеты” молекул преобладают над “посадками” и жидкость начинает испаряться. Таким образом, когда жидкость низкого давления выходит из капилляра и поступает в испаритель, она быстро превращается в газ и продолжает испаряться даже несмотря на то, что ее температура уменьшается по мере поглощения скрытой теплоты парообразования. К моменту выхода из испарителя рабочая жидкость уже полностью находится в газообразном состоянии и содержит значительное количество тепловой энергии, отнятой у внутреннего воздуха. Она покидает испаритель в виде газа низкого давления и по трубке направляется в компрессор.

Половина дела сделана: кондиционер извлек тепло из внутреннего воздуха. Но оставшаяся часть работы еще сложнее: нужно передать тепло наружному воздуху, не уменьшив при этом общую энтропию объединенной системы. Как ни крути, а второй закон термодинамики обойти невозможно.

## Как кондиционер нагревает наружный воздух

Удовлетворить требования этого закона — задача компрессора. Рабочая жидкость, возвращающаяся из испарителя в виде газа низкого давления, поступает в компрессор. Там газ сжимается до гораздо более высокой плотности и уже в виде газа высокого давления поступает в конденсатор. В компрессоре может использоваться поршень и клапан одностороннего действия (как у водяного насоса на рис. 5.2.3) либо ротационный насос. Однако вне зависимости от конкретного механизма результат будет одним и тем же: после прохождения через компрессор плотность и давление газа резко повышаются.

Сжатие газа требует работы, так как компрессор должен сжимать газ по ходу его движения, то есть сила умножается на расстояние. Так как работа переходит в энергию, компрессор увеличивает энергию газа. Кондиционеры обычно берут электроэнергию из сети и превращают ее в механическую работу с помощью электродвигателя.

В соответствии с первым законом термодинамики, эта работа повышает внутреннюю энергию рабочей жидкости. Пары рабочей жидкости могут хранить эту энергию только в виде тепловой энергии отдельных частиц. Частицы начинают двигаться быстрее, поэтому температура газа на выходе из компрессора гораздо выше, чем на входе. Этого повышения температуры нельзя избежать, поскольку сжатие рабочей жидкости неизбежно увеличивает ее температуру.

Тем временем рабочая жидкость в виде горячего газа высокого давления поступает в конденсатор. Как и испаритель, конденсатор представляет собой длинную металлическую трубку, проходящую через теплообменные пластины. Он также работает как теплообменник, и на этот раз металлические пластины обеспечивают дополнительную поверхность, которая позволяет ускорить перенос

тепла от очень горячей рабочей жидкости в трубке к менее горячему наружному воздуху. Для ускорения теплообмена кондиционер может быть оборудован вентилятором, который нагнетает наружный воздух на пластины конденсатора.

Как следует из его названия, конденсатор дает возможность поступающему в него газу превратиться в жидкость. Сжатие способствует конденсации. Когда рабочая жидкость в виде газа низкого давления направляется в компрессор, этот газ стабилен. Но в газе высокой плотности и высокого давления, который выходит из компрессора, количество “посадок” молекул существенно превышает количество “взлетов”, и газ конденсируется. Как и любое другое вещество, при переходе в жидкость этот газ высвобождает скрытую теплоту парообразования (поскольку молекулы сближаются и образуют связи). Эта скрытая теплота парообразования становится тепловой энергией рабочей жидкости, поэтому температура жидкости повышается еще сильнее, и тепло от нее через стенки трубки и пластины конденсатора вытекает наружу.

К тому моменту, как рабочая жидкость вышла из конденсатора, она успева-ет преобразовать значительную часть своей химической потенциальной энергии в тепловую и передать эту энергию наружному воздуху. Последний же в виде тепла получает не только тепловую энергию, отнятую у внутреннего воздуха, но и электрическую энергию, которую потребил компрессор. Рабочая жидкость выходит из компрессора в виде теплой жидкости высокого давления и по трубе направляется в испаритель.

Теперь выполнена и вторая половина работы кондиционера: тепло передано наружному воздуху, и при этом упорядоченная энергия преобразована в тепловую. После этого рабочая жидкость возвращается в испаритель, чтобы начать новый цикл. Она бесконечно повторяет свой путь по замкнутому контуру, извлекая тепло из внутреннего воздуха в испарителе и передавая его наружному воздуху в конденсаторе. Компрессор приводит в движение весь процесс, выполняя, таким образом, второй закон термодинамики. Точно такая же схема используется в холодильнике, чтобы извлечь тепло из воздуха внутри холодильника и передать его наружу, в воздух комнаты (рис. 8.1.4).

Собственно говоря, тепловые насосы подобного типа применяются во многих распространенных устройствах, включая кулеры (рис. 8.1.5) и бытовые отопительные приборы. В умеренном климате кондиционеры, работающие в обратном режиме, успешно отапливают дома, поскольку способны перемещать тепло против направления естественного потока в любое время — как зимой, так и летом.

Летом тепловой насос передает тепло от внутреннего воздуха наружному, чтобы охладить помещение. Зимой он передает тепло от наружного воздуха внутреннему, чтобы обогреть дом. Вместо того чтобы напрямую превращать электрическую энергию в тепловую (как это делают различные обогреватели), тепловой насос более эффективно применяет электроэнергию для переноса избыточной тепловой энергии с улицы в помещение.

Прежде чем распрощаться с кондиционерами, на минуту задержимся, чтобы поговорить о рабочей жидкости. Эта жидкость должна превращаться в газ при низком давлении и снова в жидкость — при высоком, причем делать это в широком диапазоне температур, с которыми может столкнуться кондиционер. В течение последних десятилетий в качестве стандартной рабочей жидкости применяются хлорфторуглероды, в частности разнообразные фреоны. Эти соединения заменили собой аммиак — ядовитый и агрессивный газ, который использовался в первых холодильниках.

Фреоны идеально подходят для кондиционеров, потому что они с легкостью превращаются из газа в жидкость и обратно в широком температурном интервале, а кроме того, химически инертны и при этом достаточно дешевы. К сожалению, молекулы хлорфторуглерода содержат хлор, и при утечке в окружающую среду они могут доставить атомы хлора в верхние слои атмосферы. Там хлор способствует разрушению молекул озона — важного компонента атмосферы, который частично поглощает ультрафиолетовое излучение Солнца. В последнее время в большинстве кондиционеров фреоны вытесняются не содержащими хлора гидрофторуглеродами. Они не так инертны и энергоэффективны, как фреоны, однако экологически более безопасны.

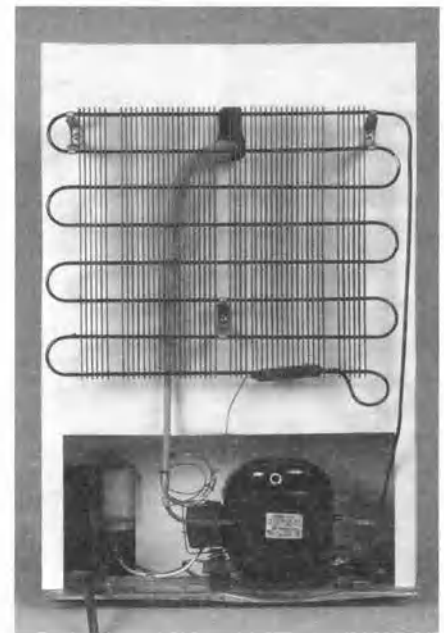
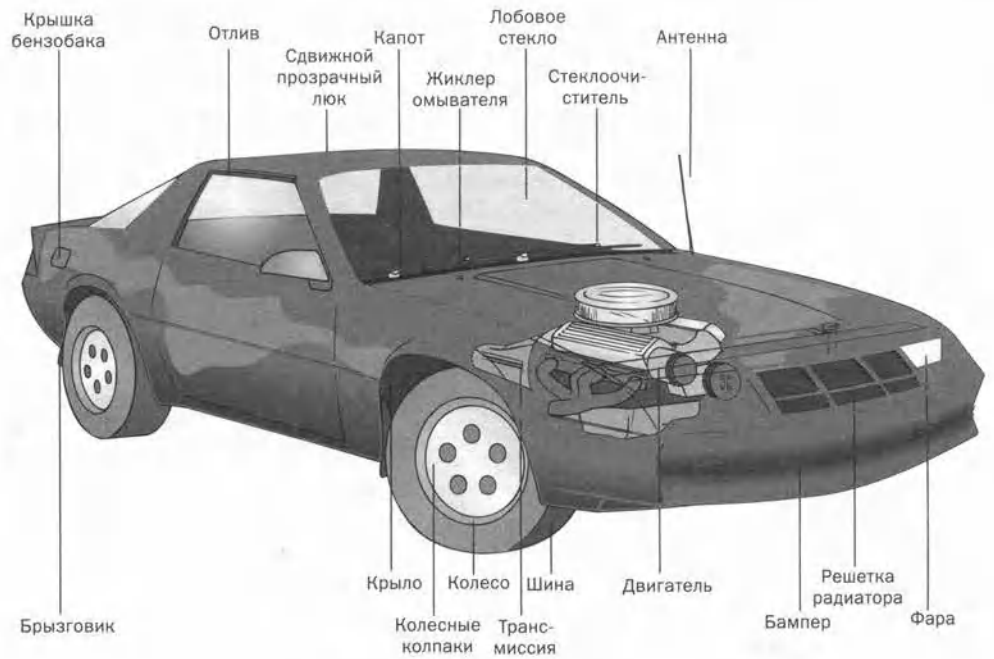


Рис. 8.1.4. Компрессор (внизу) и змеевик конденсатора (вверху) на задней стенке холодильника. Компрессор сжимает рабочую жидкость в горячий плотный газ и направляет его в конденсатор. В нем газ отдает тепло комнатному воздуху и конденсируется в жидкость. Рабочая жидкость испаряется внутри холодильника, извлекая тепло из продуктов.



Рис. 8.1.5. В этих питьевых кулерах-фонтанчиках есть встроенные тепловые насосы, которые охлаждают воду. Извлеченное из воды тепло вместе с теплом, произведенным самим тепловым насосом, передается комнатному воздуху через жалюзи на боковой стенке кулера.



## 8.2 Автомобили

Ничто не символизирует свободу и личную независимость лучше, чем автомобиль. С ключами от автомобиля в руках вы можете в любой момент отправиться почти куда угодно. Механизм, который делает возможным это чудо, называется двигателем внутреннего сгорания. Несмотря на всевозможные усовершенствования, основные принципы устройства двигателя мало изменились с тех пор, как он был изобретен более ста пятидесяти лет назад. Двигатель внутреннего сгорания использует тепловую энергию, высвобождающуюся при сгорании топлива, для совершения работы, необходимой для приведения автомобиля в движение. То, что тепловая энергия вообще может совершать работу, можно считать одним из чудес теплофизики. Этому вопросу в основном и будет посвящен данный раздел.

### Использование тепловой энергии: тепловые машины

На светофоре загорается зеленый — и вы нажимаете на педаль акселератора. Motor ревет, и несколько секунд спустя вы уже мчитесь со скоростью 100 километров в час. Шум двигателя постепенно стихает, превращается в мягкое урчание и почти не слышен на фоне работающего радио и гудящего ветра.

Мотор — сердце автомобиля, он трогает машину с места на светофоре и заставляет ее продолжать движение вопреки силам гравитации, трения и сопротивления воздуха. Это не просто чудо техники. Это также волшебство теплофизики, потому что двигатель выполняет задачу, которая кажется невыполнимой, — превращает тепловую энергию в упорядоченную. Но ведь второй закон термодинамики запрещает прямой переход тепловой энергии в упорядоченную! Как же тогда автомобильному мотору удастся перемещать автомобиль за счет сжигания топлива?

Автомобильный двигатель не конфликтует со вторым законом, поскольку представляет собой тепловую машину — устройство, которое превращает тепловую энергию в упорядоченную при передаче тепла от горячего тела к холодному (рис. 8.2.1). Да, тепловая энергия одного тела не может быть превращена в работу, но это ограничение не относится к системе двух тел при разных температурах. Поскольку тепло, переходящее от горячего тела к холодному, увеличивает общую энтропию системы, небольшая часть тепловой энергии может быть превращена в работу без уменьшения суммарной энтропии системы — и без нарушения второго закона термодинамики.

Попробуем взглянуть на тепловую машину с другой точки зрения — изучим роли горячего и холодного тела в процессе ее работы. Горячее тело предоставляет

тепловую энергию, которая превращается в работу. Холодное тело предоставляет порядок, необходимый, чтобы осуществить это превращение. Когда тепловая машина работает, горячее тело теряет часть своей тепловой энергии, холодное — часть своей упорядоченности. Тепловая машина использует и то и другое для производства упорядоченной энергии. Так как тепловая машина одинаково нуждается и в тепловой энергии, и в упорядоченности, она не может работать, если отсутствует одно из тел — будь то горячее или холодное.

В автомобильном двигателе роль горячего тела выполняет сжигаемое топливо, а роль холодного — наружный воздух. Часть тепла на пути от сжигаемого топлива к наружному воздуху отводится и преобразуется в упорядоченную энергию, которая обеспечивает движение автомобиля. Но каково максимальное количество тепловой энергии, которую двигатель может превратить в упорядоченную?

Для ответа на этот вопрос давайте взглянем на упрощенную схему двигателя. Мы будем рассматривать сжигаемое топливо и наружный воздух как две части отдельной термически изолированной системы. Что же происходит с суммарной (или полной) энтропией этой системы, когда работает мотор? Согласно второму закону термодинамики, суммарная энтропия системы не должна уменьшаться, пока двигатель преобразует часть тепловой энергии в упорядоченную.

Когда автомобиль просто стоит на светофоре и его двигатель работает на холостом ходу, то этот двигатель не совершает никакой работы: тепло просто передается от горячего сжигаемого топлива холодному наружному воздуху. Полная энтропия системы возрастает, так как это тепло вносит больше беспорядка в холодный воздух, чем уносит его из горячего топлива. На самом деле энтропия системы весьма резко возрастает, потому что топливо при сжигании имеет намного более высокую температуру, чем окружающий холодный воздух.

Подобное увеличение энтропии системы — вещь ненужная и расточительная. Второй закон термодинамики требует всего лишь, чтобы двигатель добавлял в холодный наружный воздух столько же энтропии, сколько он удаляет из горячего топлива. Поскольку небольшого количества теплоты вполне достаточно для внесения беспорядка в холодный воздух, двигатель автомобиля мог бы вносить в наружный воздух гораздо меньше тепла, чем он извлекает из горящего топлива, и при этом не вызывать уменьшения суммарной энтропии системы. Пока двигатель доставляет наружу достаточно тепла для того, чтобы суммарная энтропия не понизилась, ничто не мешает ему превращать оставшееся тепло в упорядоченную энергию!

Это преобразование и начинается в ту же секунду, как вы убираете ногу с тормоза и нажимаете на педаль газа. Вместо того чтобы передавать всю тепловую энергию сжигаемого топлива наружному воздуху, ваш автомобиль извлекает определенное ее количество в виде упорядоченной энергии и использует, чтобы привести в движение колеса. Пока от горячего тела к холодному передается достаточно тепла, чтобы выполнялся второй закон термодинамики, двигатель может превращать остаток тепла в упорядоченную энергию.

Выполнять второй закон термодинамики тем легче, чем выше разность температур между двумя телами. Когда она огромна, как в случае с автомобильным мотором и холодным воздухом вокруг, довольно большая часть тепловой энергии, отдаваемой горячим телом, может быть превращена в упорядоченную, по крайней мере в теории. Для идеально эффективного автомобильного двигателя (или другой тепловой машины) отношение между теплом, отведенным от горячего тела, теплом, подведенным холодному телу, и совершенной работой описывается уравнением:

$$\begin{aligned} \text{совершенная работа} &= \\ &= \text{количество теплоты, отведенной от горячего тела} \times \frac{\text{температура}_{\text{гор}} - \text{температура}_{\text{хол}}}{\text{температура}_{\text{гор}}} \\ \text{количество теплоты, подведенной холодному телу} &= \\ &= \text{количество теплоты, отведенной от горячего тела} - \text{совершенная работа} \end{aligned} \quad (8.2.1)$$

К сожалению, теоретического предела на практике трудно достичь и даже наиболее совершенные автомобильные двигатели извлекают лишь примерно половину упорядоченной энергии, рассчитанной по уравнению 8.2.1. Но уже и это — замечательное достижение и огромная заслуга ученых и инженеров, которые активно трудятся, чтобы сделать автомобили настолько энергоэффективными, насколько это возможно.



**Рис. 8.2.1.** Тепловая машина превращает тепло (тепловую энергию горячей области) в работу (упорядоченную энергию), когда тепло переходит из горячей области в холодную. Чем больше разность температур между двумя областями, тем большую часть тепла можно превратить в работу.

## Двигатель внутреннего сгорания

Двигатель внутреннего сгорания, изобретенный в 1867 году немецким инженером Николаусом Августом Отто, называется так потому, что топливо в этом случае сгорает непосредственно внутри двигателя. Бензин и воздух поступают в закрытую камеру сгорания, смешиваются, и затем эта смесь поджигается. В результате повышения температуры повышается и давление газа, и это позволяет двигателю совершать работу над подвижной поверхностью (поршнем).

Чтобы извлечь работу из топлива, двигатель внутреннего сгорания должен последовательно выполнить четыре задачи:

- 1 ввести топливно-воздушную смесь в замкнутый объем;
- 2 поджечь эту смесь;
- 3 обеспечить горячим газам, образовавшимся в результате сгорания, возможность совершить работу;
- 4 избавиться от выхлопных газов.

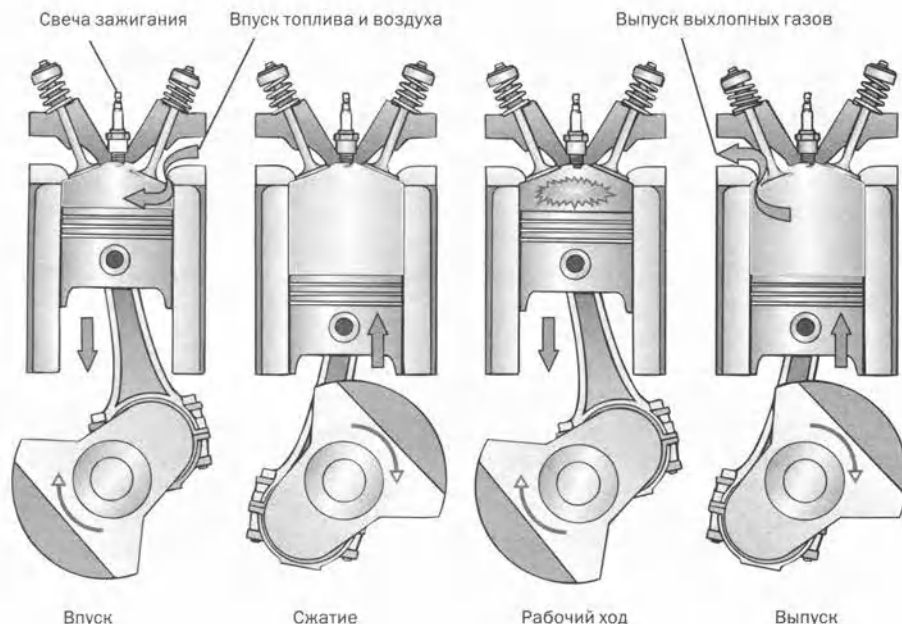
В стандартном четырехтактном инжекторном бензиновом двигателе современного автомобиля эта последовательность событий разворачивается внутри одного цилиндра (рис. 8.2.2). Двигатель называется четырехтактным, потому что его действие делится на четыре четко различимых шага (такта): впуск, сжатие, рабочий ход, выпуск выхлопных газов. Слово "инжекторный" обозначает тип устройства, которое применяется в данном случае для смешивания топлива и воздуха при вводе смеси в цилиндр.

В автомобильном двигателе обычно имеется четыре или больше таких цилиндров. Каждый цилиндр представляет собой отдельный источник энергии, он закрыт с одного конца и снабжен подвижным поршнем, несколькими клапанами, топливным инжектором и свечой зажигания. Поршень ходит по цилиндру вверх и вниз, то уменьшая, то увеличивая объем внутренней полости цилиндра (камеры сгорания). Клапаны на закрытом конце цилиндра открываются для впуска топлива и воздуха в камеру сгорания или для выпуска из нее выхлопных газов. Топливный инжектор смешивает топливо с воздухом при вводе в цилиндр. Наконечник свечи зажигания, также расположенная на закрытом конце цилиндра, воспламеняет топливовоздушную смесь, чтобы высвободить ее химическую потенциальную энергию в виде тепловой энергии.

Топливоздушная смесь поступает в каждый цилиндр на такте впуска. Для этого двигатель оттягивает поршень от закрытого конца цилиндра, так что камера сгорания резко увеличивается в объеме и в ней создается частичный вакуум. В тот же момент открываются впускные клапаны, и под действием атмосферного давления в цилиндр нагнетается новая порция воздуха. Топливный инжектор впрыскивает в этот воздух распыленное топливо, и цилиндр наполняется горючей топливно-воздушной смесью. Поскольку для создания частичного вакуума нужно совершить работу, двигатель совершает эту работу над цилиндром на такте впуска.

В конце такта впуска впускные клапаны закрываются, чтобы не дать топливоздушной смеси выйти обратно из цилиндра. Начинается такт сжатия. Поршень движется в сторону закрытого конца цилиндра, камера уменьшается, плотность топливоздушной смеси резко возрастает. Так как для сжатия газа нужно совершить работу, двигатель совершает эту работу над смесью на такте сжатия. В соответствии с первым законом термодинамики эта работа увеличивает внутреннюю энергию топливоздушной смеси. Эта газообразная смесь не может хранить добавленную энергию в виде потенциальной, поэтому ее тепловая энергия растет и температура смеси повышается. Повышение плотности, как и повышение температуры, увеличивают давление в смеси, которое достигает максимального значения, когда поршень приближается к свече зажигания.

В конце такта сжатия на свечу подается высоковольтный разряд, смесь воспламеняется и быстро сгорает, образуя горячий выхлопной газ высокого давления (в дальнейшем для простоты мы будем называть его просто горячим газом). Этот газ и производит работу над автомобилем во время такта рабочего хода. В этом такте газ давит на поршень и отталкивает его назад от закрытого конца



**Рис. 8.2.2.** Четырехтактный цилиндр. Во время такта впуска топливо и воздух входят в цилиндр. Во время такта сжатия смесь сжимается до минимального объема. Свеча зажигания воспламеняет смесь, и во время такта рабочего хода горячий газ совершает работу над автомобилем. Наконец, во время такта выпуска происходит выброс выхлопных газов из цилиндра.

цилиндра, так что камера сгорания расширяется и плотность горячего газа падает. Горячий газ оказывает на поршень высокое давление, двигая его, то есть совершает работу над поршнем и в конце концов приводит автомобиль в движение. По мере выполнения работы горячий газ отдает свою тепловую энергию и охлаждается в соответствии с первым законом термодинамики. Плотность и давление газа также уменьшаются. В конце такта рабочего хода газ охлаждается настолько, что его давление лишь в несколько раз больше атмосферного. Цилиндр извлек большую часть химической энергии топлива в виде работы.

Во время последнего такта цилиндр избавляется от выхлопных газов: в такте выпуска двигатель вновь толкает поршень в сторону закрытого конца цилиндра, но при этом выпускные клапаны открываются. Поскольку к концу такта рабочего хода давление выхлопного газа в камере сгорания все еще гораздо выше атмосферного, он устремляется наружу, как только открываются клапаны.

Эти резкие выхлопы газов, выходящих из цилиндра, и сливаются в характерное «пфф-пфф-пфф» работающего двигателя. Не будь на выхлопной трубе глушителя, двигатель сильно раздражал бы нас своим ревом.

Открывшиеся выпускные клапаны высвобождают большую часть выхлопных газов, а оставшаяся их часть выдавливается, когда поршень снова начинает перемещаться в направлении закрытого конца цилиндра. Избавляясь от остатков выхлопных газов, двигатель снова совершает работу над цилиндром. В конце такта выпуска цилиндр пустеет, и выпускные клапаны закрываются. Цилиндр готов начать новый такт впуска.

## Эффективность двигателя

Задача двигателя внутреннего сгорания — извлечь из данного количества топлива максимально возможное количество работы. Теоретически вся химическая потенциальная энергия топлива может быть преобразована в работу, поскольку и та и другая представляют собой упорядоченные формы энергии. Но химическую потенциальную энергию трудно напрямую перевести в работу, поэтому двигатель вместо этого сжигает топливо. Это весьма неэффективный способ, поскольку двигатель, сжигая топливо, непосредственно превращает его химическую потенциальную энергию в тепловую и создает тем самым большое количество совершенно ненужной энтропии.

Но не все еще потеряно. Так как температура горения топлива очень высока, довольно большая часть его тепловой энергии может быть преобразована в упорядоченную форму путем отвода части тепла, текущего от сжигаемого топлива к наружному воздуху. Как мы уже отмечали, чем горячее сжигаемое

1 Пистолет использует горячий газ высокого давления, чтобы послать пулю вдоль ствола. Этот горячий газ высокой плотности образуется очень быстро, когда обладающий большим запасом энергии заряд патрона подвергается внезапной химической реакции. Давление этого газа настолько велико, что патрон расширяется и его тонкие стенки из пластичной латуни плотно прилегают к внутренней поверхности стального ствола, образуя непроницаемое для газа соединение. Закупоренный позади пули газ с огромной силой давит на нее, в то время как в стволе перед пулей сохраняется атмосферное давление. В результате громадной разницы давлений пуля с возрастающей скоростью движется в направлении открытого конца ствола. Пока пуля проходит через ствол, горячий газ совершает над ней работу, поэтому температура газа уменьшается, так же как и его плотность и давление. К тому моменту, когда пуля вылетает из ствола, большая часть тепловой энергии газа уже преобразована в кинетическую энергию пули. В длинном стволе ружья это преобразование происходит более полно, чем в коротком стволе пистолета. Когда пуля выходит из ствола, мгновенный выброс сжатого газа в воздух создает ударную волну, которая в основном и служит причиной громкого звука выстрела. Однако если пуля движется быстрее звука, то она и сама произведет громкий хлопок, когда вызванная ею ударная волна достигнет ваших ушей. В «бесшумных» пистолетах используются глушители с внутренними перегородками, которые задерживают выход газа из ствола и тем самым подавляют ударную волну. Чтобы избежать хлопка, пуля из такого пистолета должна вылетать с дозвуковой скоростью.

2 Для смешивания топлива и воздуха перед поступлением в цилиндры в старых моделях автомобилей используется устройство под названием карбюратор. Карбюратор размещается над двигателем и регулирует соотношение топлива и воздуха. Обычно одна часть бензина смешивается примерно с 15 частями воздуха (по массе). При смешивании используется эффект Вентури: в карбюраторе на пути к цилиндрам воздух проходит через сужение, при этом скорость воздуха увеличивается и его давление падает. Бензин через реактивное сопло устремляется к этой области низкого давления и распыляется при впрыскивании в быстро движущийся воздушный поток. Затем смесь топлива и воздуха подается из карбюратора в цилиндры и там поджигается.

топливо и чем холоднее наружный воздух, тем больше упорядоченной энергии может извлечь двигатель. Для максимальной эффективности, двигателю требуется, чтобы продукты сгорания имели максимально возможную температуру, — тогда горячий газ сможет совершить максимально возможную работу над поршнем. А выпускаемый газ, наоборот, должен быть как можно более холодным (об еще одном способе извлечения работы из расширяющегося и охлаждающегося газа см. 1).

Было бы чудесно, если бы во время такта рабочего хода горячий газ расширялся и охлаждался до температуры наружного воздуха. Тогда выхлопной газ выходил бы из двигателя с тем же запасом тепловой энергии, с каким он туда вошел, а значит, двигатель полностью извлекал бы химическую потенциальную энергию топлива в виде работы. К сожалению, полное превращение тепловой энергии в упорядоченную противоречило бы второму закону термодинамики. Как следует из уравнения 8.2.1, работающая тепловая машина всегда передает некоторое количество тепла холодному телу. В данном случае двигатель выбрасывает выхлопной газ до того, как тот остынет до температуры наружного воздуха. Выбора нет: выхлоп должен быть горячим!

На самом деле двигатели внутреннего сгорания зря тратят много энергии и совершают меньше работы, чем позволяет второй закон термодинамики. Например, некоторая часть тепла теряется, когда переходит от горячего газа на стенки цилиндра и удаляется системой охлаждения двигателя. Эти тепловые потери не могут быть преобразованы в работу. Кроме того, трение скольжения в цилиндре также приводит к потерям механической энергии и требует постоянной смазки. В конечном итоге двигатель внутреннего сгорания превращает в работу лишь 20–30% химической потенциальной энергии топлива.

## Повышение эффективности двигателя

Чтобы получить горячий газ максимально высокой температуры, требуется, топливовоздушная смесь во время такта сжатия должна быть сжата до минимально возможного объема. Чем сильнее поршень сжимает смесь, тем выше будут ее плотность, давление и температура перед поджигом и тем горячее будут продукты горения после него. Поскольку эффективность любой тепловой машины возрастает, когда увеличивается температура горячего тела, и поскольку в данной системе горячим телом является газ — продукт горения, — то увеличение его температуры повышает эффективность.

Насколько объем цилиндра уменьшается во время такта сжатия, определяется степенью сжатия — отношением объема камеры сгорания в начале такта сжатия к ее объему в конце этого такта. Чем больше степень сжатия, тем горячее будут газообразные продукты горения и тем выше энергоэффективность двигателя. Обычно степень сжатия колеблется между 8:1 и 12:1, хотя в двигателях высокого сжатия может достигать значения 15:1.

К сожалению, степень сжатия нельзя повышать до бесконечности. Если двигатель слишком сильно сожмет топливовоздушную смесь, то она настолько разогреется, что воспламенится сама по себе. Такое самовозгорание из-за сверхсжатия называется ранним зажиганием или детонацией. Если мотор «стучит», это значит, что бензин сгорает раньше, чем двигатель готов извлечь из него работу. Следовательно, большая часть энергии тратится впустую.

Существует два способа борьбы с детонацией. Во-первых, можно более равномерно смешивать топливо с воздухом. В неоднородной смеси могут образовываться небольшие области, где смесь будет более горячей (и более готовой к самовозгоранию), чем в других. Система впрыска топлива, используемая в современных автомобилях, обеспечивает прекрасное смешивание, а также позволяет бортовому компьютеру выбирать режим, способствующий полному сгоранию топлива (а значит, минимальному загрязнению окружающей среды). Таким образом, если не говорить об устранении серьезных неполадок с зажиганием, имеется не так уж много возможностей повысить однородность смеси (о более старых системах смешивания топлива см. 2).

Во-вторых, можно использовать более подходящее топливо. Разные виды топлива воспламеняются при разной температуре, поэтому нужно выбирать топли-



во, которое может выдержать степень сжатия вашего двигателя без самопроизвольного возгорания. Именно этим вы занимаетесь, когда заливаете в бак бензин определенного сорта. Бензин “регуляр” воспламеняется при относительно низкой температуре и потому наиболее восприимчив к детонации.

Бензины сортов “премиум” и “супер” воспламеняются при относительно высокой температуре и более устойчивы к детонации. Поэтому им присваиваются более высокие октановые числа (таблица 8.2.1). Выбор подходящего топлива сводится к определению минимального октанового числа, которое ваш двигатель может потреблять без детонации.

Октановое число	Приблизительная температура воспламенения
87 (“регуляр”)	750 °С
90 (“премиум”)	800 °С
93 (“супер”)	850 °С

**Таблица 8.2.1.**  
Приблизительная температура самовоспламенения трех стандартных марок бензина при сжатии\*.

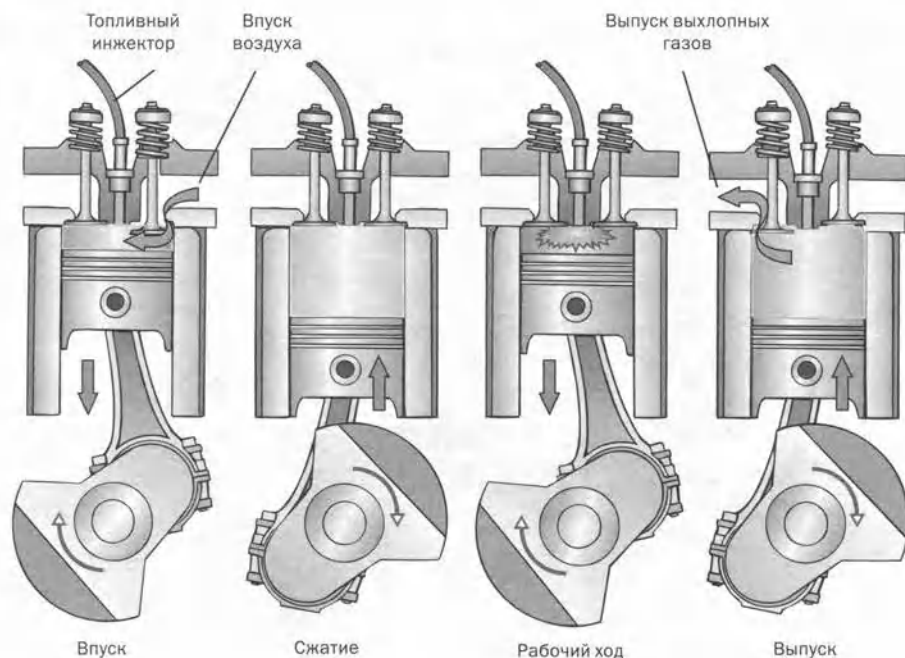
\* Значения, приведенные в таблице, соответствуют классификации сортов бензина, принятой в США. — Прим. ред.

## Дизельные двигатели и турбокомпрессоры

Детонация устанавливает предел степени сжатия, тем самым определяя предел эффективности бензинового двигателя. В то же время в дизельных двигателях проблемы детонации удастся избежать, разделив топливо и воздух в такте сжатия (рис. 8.2.3). Дизельный двигатель, изобретенный немецким инженером Рудольфом Христианом Карлом Дизелем (1858–1913) в 1896 году, не использует для воспламенения топлива свечи зажигания. Вместо этого он подвергает очень высокой степени сжатия (примерно 20:1) входящий воздух, а затем впрыскивает дизельное топливо непосредственно в цилиндр в начале такта рабочего хода. Смешиваясь с раскаленным сжатым воздухом, топливо самовоспламеняется.

Благодаря более высокой степени сжатия, дизельные двигатели сжигают топливо при более высокой температуре, чем бензиновые, и поэтому могут быть более энергоэффективными. По сравнению с бензиновыми “горячее тело” дизелей горячее и поэтому способно превращать в работу большую часть тепла. К сожалению, дизельный двигатель в определенных условиях бывает труднее запустить, а система впрыска топлива должна быть очень тщательно выставлена по времени.

В некоторых бензиновых и дизельных двигателях система впрыска топлива комбинируется с турбокомпрессором. Это устройство, в сущности, представляет собой вентилятор, который нагнетает наружный воздух в цилиндр во время так-



**Рис. 8.2.3.** В цилиндре дизельного двигателя во время такта сжатия находится только воздух. Поршень совершает над ним работу, в результате чего воздух становится чрезвычайно горячим. В начале такта рабочего хода в цилиндр впрыскивается дизельное топливо. Топливо самовоспламеняется, и во время такта рабочего хода горячий газ совершает работу над поршнем и двигателем.

та впуска. В результате в каждом такте рабочего хода двигатель сжигает больше топлива, то есть ведет себя так, как если бы его рабочий объем был больше, чем он есть на самом деле. Вентилятор турбокомпрессора вращается под действием давления выхлопных газов. Почти идентичное устройство, которое называется воздушным нагнетателем, питается непосредственно от двигателя.

Недостаток турбонаддува, помимо дороговизны конструкции и быстрого износа двигателя, заключается в том, что он способствует детонации. Когда турбокомпрессор нагнетает воздух в цилиндр, он совершает работу над воздухом, и воздух нагревается. Поскольку смесь топлива с воздухом в этом случае поступает в цилиндр уже очень горячей, она может сдетонировать во время такта сжатия. Чтобы избежать детонации в двигателе с турбонаддувом, вам может понадобиться бензин более высокого качества. Некоторые автомобили с турбокомпрессорами оборудованы интеркулерами, или промежуточными холодильниками, которые забирают тепло от воздуха, проходящего через турбокомпрессор. Подавая в цилиндры холодный воздух высокой плотности, интеркулер позволяет снизить максимальную температуру такта сжатия и таким образом избежать детонации и вызываемого ею стука в двигателе.

## Многоцилиндровые двигатели

Задача двигателя — извлечь работу из топливоздушную смеси, поэтому очень важно, чтобы каждый цилиндр совершал больше работы, чем он потребляет. В течение трех тактов четырехтактный двигатель совершает работу над различными газами, и только во время одного такта происходит извлечение работы из горячего газа. Во время впуска двигатель совершает работу, подавая топливоздушную смесь в цилиндр. Во время сжатия — совершает работу по сжатию этой смеси. Такт выпуска — двигатель совершает работу по выдавливанию выхлопного газа из цилиндра. К счастью, работа, которую горячий газ совершает над двигателем во время рабочего хода, больше, чем суммарная работа, выполняемая двигателем во время остальных трех тактов.

Тем не менее перед каждым тактом рабочего хода двигатель должен передать цилиндру довольно большое количество энергии. Чтобы обеспечить эту начальную энергию, большинство четырехтактных двигателей имеют четыре цилиндра и более (рис. 8.2.4). Работа цилиндров синхронизирована таким образом, чтобы в любой отрезок времени какой-то один из них совершал такт рабочего хода. Цилиндр, совершающий такт рабочего хода, обеспечивает работу, позволяющую остальным трем цилиндрам в это же время совершать другие такты. При этом остается еще достаточно работы, чтобы приводить в движение автомобиль.

В то время как поршни ходят взад и вперед, двигателю нужно откуда-то взять вращательное движение, чтобы он смог провернуть колеса. Возвратно-поступательное движение поршней преобразуется во вращательное при помощи колен-

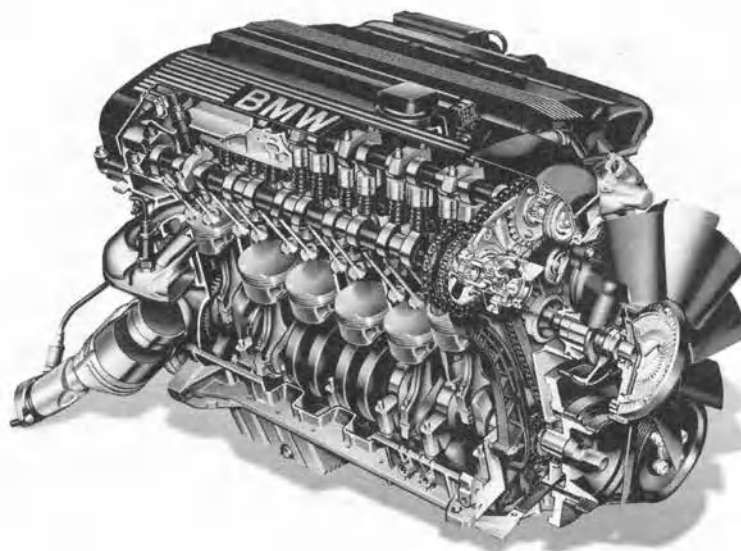


Рис. 8.2.4. На изображенном в разрезе автомобильном двигателе BMW видны шесть расположенных в один ряд поршней. Цилиндры на рисунке не показаны.

чатого вала, с которым посредством шатунов соединены цилиндры. Коленчатый вал представляет собой толстый стальной стержень, подвешенный на подшипниках и состоящий из нескольких колен, по одному на каждый цилиндр. Когда поршень движется к выходу из цилиндра (такт рабочего хода), он толкает шатун, шатун давит на колено коленчатого вала и проворачивает вал. Следовательно, шатун создает крутящий момент и передает его коленчатому валу. Коленчатый вал, вращаясь в подшипниках, передает крутящий момент дальше, чтобы его можно было использовать для приведения автомобиля в движение. Таким образом, каждый цилиндр создает начальное усилие, а коленчатый вал воспринимает усилия, передаваемые от поршней через шатуны, и преобразует их в крутящий момент.

Вращающийся коленчатый вал передает мощность на трансмиссию, а оттуда она передается колесам. В результате значительная часть тепла, выделяющегося при сгорании топливовоздушной смеси, превращается в работу и используется для вращения колес автомобиля. За счет сил трения при сцеплении с дорожным покрытием колеса толкают машину вперед, и вы мчитесь по автостраде к пункту своего назначения.

## Система зажигания

---

В цилиндре бензинового двигателя за воспламенение топливовоздушной смеси точно в начале такта рабочего хода отвечает свеча зажигания. Воспламенение происходит, когда через узкий зазор на конце свечи проскакивает электрическая искра. Но откуда же берется электрический ток?

В более старых моделях автомобилей электрический ток сначала подается из системы электрооборудования автомобиля (она включает в себя аккумулятор) на магнитную катушку устройства, которое называется прерыватель. Ток намагничивает катушку, то есть снабжает ее магнитной потенциальной энергией (подробнее мы обсудим это в главе 11). В начале рабочего хода особое механическое устройство размыкает контакты прерывателя, прерывая прохождение тока через первичную обмотку катушки. Последняя резко теряет намагниченность, и накопленная в катушке энергия высвобождается в виде тока, который тут же возникает во вторичной обмотке катушки. Ток вторичной обмотки и проходит через свечу зажигания, возбуждая искру. Собственно говоря, в двигателе есть несколько свечей зажигания (по одной на каждый цилиндр), поэтому ток от катушки направляется в соответствующую свечу с помощью вращающегося механического переключателя, который называется распределитель.

Однако топливовоздушная смесь не сгорает мгновенно. Пламя распространяется по смеси со скоростью меньше скорости звука, и ему требуется примерно тысячная доля секунды, чтобы пройти всю камеру сгорания — от свечи зажигания до поверхности поршня. Когда двигатель работает на небольших оборотах, это время не так уж важно, но на высоких оборотах топливовоздушная смесь должна загораться немного раньше, чтобы получить максимальную работу от отработавшего газа. Поэтому при увеличении оборотов двигателя ускоряется время срабатывания прерывателя.

С изобретением электронного зажигания способы получения хорошо рассчитанной по времени искры стали более изощренными. Электроника заменила прерыватели и катушки более сложными устройствами. Тем не менее системы электронного зажигания по-прежнему получают от двигателя информацию о необходимом моменте зажигания, все еще используют механические распределители и все так же производят высоковольтный электрический импульс с помощью магнитного устройства, напоминающего катушку. При этом для точного выставления момента зажигания используется компьютер, так что двигатель может работать гораздо более эффективно на всех скоростях и при любых режимах.

## Контроль выхлопа

---

Одна из причин, по которой двигатель внутреннего сгорания не способен достичь 100-процентной эффективности, — неполное сгорание топлива. Очень сложно создать идеальную смесь, в которой количество молекул топлива в точ-

ности соответствовало бы количеству молекул кислорода (именно это могло бы обеспечить полное сгорание). Если воздуха намного больше, чем топлива, смесь может вообще не загореться. Но даже если смесь хорошо сбалансирована, не каждая молекула топлива реагирует с кислородом до конца, образуя углекислый газ и воду. В результате некоторые молекулы топлива могут выйти из цилиндра практически в том же виде, в котором туда вошли. Эти не до конца сгоревшие молекулы не просто напрасно растрачивают энергию — они еще и загрязняют атмосферу.

Современные двигатели борются с неполным сгоранием как минимум двумя способами. Во-первых, двигатель пытается повторно сжечь топливо, не сгоревшее в цилиндре. Во время такта впуска давление внутри цилиндра, как мы уже знаем, падает ниже атмосферного. Это разрежение используется в том числе и для того, чтобы втянуть обратно в цилиндр и сжечь пары топлива, просочившиеся наружу: система принудительной вентиляции картера (СПВК) улавливает эти пары в полости картера, окружающего коленчатый вал. Из области более высокого давления в картере пары несгоревшего топлива втягиваются в область более низкого давления внутри цилиндра через клапан принудительной вентиляции.

Второй способ удалить молекулы несгоревшего топлива из отработанных газов — использование каталитического конвертера-нейтрализатора. Принцип работы этого устройства основан на использовании какого-либо катализатора, облегчающего молекулам топлива реакцию с кислородом. Катализатор — это химическая поверхность, которая помогает протеканию реакции, снижая энергию активации, необходимую для этой реакции. При относительно низких температурах молекулы топлива и кислорода не будут реагировать, потому что им не хватает начальной энергии, необходимой для разрыва уже существующих химических связей, а без этого не могут образоваться новые, более прочные связи. Катализатор как раз и помогает разорвать эти старые связи и облегчает формирование новых.

В автомобильных двигателях в качестве катализатора — поверхности, на которой окисляются остатки несгоревшего топлива, — обычно применяют платину. Микроскопические частицы этого металла нанесены на сотовую керамическую основу, через которую отработанные газы должны пройти на пути в глушитель и далее в выхлопную трубу. Частицы платины настолько малы, что почти все их атомы находятся на поверхности частицы. Суммарно же они образуют огромную поверхность, с которой и контактируют выхлопные газы. Несгоревшие или не полностью сгоревшие молекулы топлива на короткое время прилипают к частице катализатора, вступают там в реакцию с кислородом и покидают катализатор уже в виде воды и углекислого газа.

Вместе с платиной в конвертере-нейтрализаторе используются частицы родия. Родий служит катализатором для “несгоревших” молекул оксидов азота, которые также образуются в цилиндрах при сгорании топлива. Родий способствует превращению оксидов в безвредные азот и кислород. Компьютер современного автомобиля использует данные датчика кислорода в выхлопной системе для регулирования состава топливовоздушной смеси, чтобы минимизировать выбросы как несгоревшего топлива, так и оксидов азота.

Но прежде чем каталитический нейтрализатор начнет работать, выхлопные газы двигателя должны его прогреть, поэтому в первые минуты после запуска автомобиля нейтрализатор еще не функционирует. Но как только нейтрализатор становится достаточно горячим, запускаются реакции, которые еще сильнее разогревают конвертер. Чем горячее катализатор, тем лучше он работает, однако если в него за короткое время поступит слишком много несгоревшего топлива, то возникнет угроза перегрева устройства (более подробно об этом см. ❸). Может произойти и “отравление” катализатора — в том случае, если в конвертер попадут частицы определенного материала (например, свинца), которые покроют собой частицы благородного металла и тем самым помешают катализатору функционировать. Достаточно один раз заправить бак этилированным (содержащим свинец) бензином — и каталитический нейтрализатор может выйти из строя.

## Ручная трансмиссия: трение и шестерни

Как велосипед использует шестерни и трещотки для передачи усилия от педалей на заднее колесо, так и в автомобиле имеется трансмиссия — система пе-

❸ Каталитический конвертер-нейтрализатор обычно расположен под двигателем и является одной из частей выхлопной системы. Из-за того что конвертер сильно разогревается во время работы, он защищен теплоизолирующим кожухом. Тем не менее очень опасно парковать машину с раскаленным конвертером в месте, где на земле есть какой-нибудь легковоспламеняющийся материал. Каждую осень несколько автомобилей в США сгорают, потому что хозяева неосмотрительно поставили их на парковке, усыпанной опавшей листвой.

редачи крутящего момента от двигателя на ведущие колеса. Кроме того, трансмиссия создает выигрыш в силе (передаточное отношение) во время движения, а также может, когда необходимо, разъединить двигатель и колеса. Выигрыш в силе позволяет автомобилю преодолевать подъемы, а разъединение — останавливаться на светофоре.

Существуют два типа трансмиссии: ручная и автоматическая. В автомобилях с ручной (механической) коробкой передач водитель сам разъединяет и вновь соединяет двигатель и колеса и регулирует передаточное отношение. Автоматическая трансмиссия выполняет обе эти задачи самостоятельно.

В машинах с механической передачей отсоединение двигателя от трансмиссии происходит с помощью дискового сцепления. Этот агрегат состоит из двух дисков, один из которых вращается двигателем, а второй служит для передачи этого вращения на колеса. Обычно при движении автомобиля оба диска плотно прижаты друг к другу мощной пружиной, и сила трения между ними заставляет диски вращаться вместе. Однако когда вы нажимаете на педаль сцепления в автомобиле с ручной коробкой, два диска отделяются один от другого, и двигатель начинает работать на холостом ходу.

Когда вы отпускаете педаль сцепления, два диска снова соединяются и трение скольжения начинает выравнивать их угловые скорости. Когда диски достигают одинаковой угловой скорости, статическое трение заставляет их вращаться вместе. Помимо всего прочего, педаль сцепления позволяет вам плавно трогаться с места, не вынуждая двигатель работать на таких низких оборотах, что он вот-вот заглохнет.

Когда вы выжимаете или отпускаете педаль сцепления, на диски действует сила трения скольжения, они преобразуют работу в тепловую энергию и сильно нагреваются. Как правило, вам требуется лишь несколько мгновений на то, чтобы включить или выключить сцепление, поэтому периоды действия трения скольжения очень короткие и редкие. Однако если вы “жжете сцепление”, то есть неплотно прижимаете диски, позволяя им в течение более или менее длительного времени проскальзывать относительно друг друга, то трение скольжения может перегреть их, и сцепление быстро выйдет из строя.

Сцепление передает крутящий момент от двигателя на коробку передач, где этот крутящий момент проворачивает набор шестерен. Каждая вращающаяся шестерня может передать крутящий момент дальше, для этого к ней нужно подвести шестерню из второго набора, соединенного с колесами. Когда сцепление выключено, два набора шестерен разъединены и двигатель работает на холостом ходу (колеса не вращаются). Однако водитель может с помощью рычага (кулисы) соединить определенную пару шестерен — и тогда двигатель начинает вращать колеса.

В стандартном легковом автомобиле имеется пять передач для движения вперед и одна задняя. На первой (самой низкой) передаче коленчатый вал двигателя вращается гораздо быстрее, чем колеса. Несмотря на то, что колеса вращаются медленно, через коробку передач на них подается большой крутящий момент. Поэтому вы пользуетесь первой передачей, чтобы тронуться с места или подняться на очень крутой подъем. На самой высокой (пятой) передаче колеса вращаются с такой же или даже с более высокой угловой скоростью, чем коленчатый вал, и на них подается лишь небольшой крутящий момент от коробки передач. Пятая скорость идеально подходит для того, чтобы быстро ехать по более или менее ровной и прямой дороге.

В ручной коробке передач предусмотрен и задний ход. Чтобы запустить вращение колес в обратном направлении, достаточно добавить между двигателем и колесами одну дополнительную промежуточную шестерню. Каждый раз, когда она подключается, направление вращения меняется на противоположное. Поэтому у автомобиля есть только одна “задняя скорость”.

Небольшую вариацию стандартной коробки передач представляет собой коробка с синхронизатором. В такой коробке передач водитель не выбирает, какие шестерни задействовать, а какие нет: шестерни от двигателя и от колес всегда связаны между собой. Однако при этом они непосредственно не связаны с приводными валами в коробке передач. Для соединения шестерни с валом рычаг переключения передач перемещает зубчатую муфту, соединяя зубчатый цилиндр на шестерне с зубчатыми цилиндрами на валу. При передвижении муфты для равномерного уравнивания (синхронизации) угловых скоростей вала и шестерни ис-

пользуется фрикционный конус. Поскольку шестерни постоянно вращаются, они могут иметь косые зубцы, которые делают работу более тихой, чем при использовании шестерен с прямыми зубцами. Прямые зубцы при сцеплении всякий раз издадут стук, в то время как косые зубцы сцепляются постепенно по мере поворота шестерни и потому не стучат.

## Автоматическая трансмиссия: жидкость и шестерни

---

В автомобиле с автоматической коробкой передач вместо сцепления используют одну или несколько гидравлических муфт, а управление коробкой передач осуществляется автоматически. В гидромуфте крутящий момент передается с помощью жидкости, которая циркулирует между двумя ввертными колесами. Двигатель поворачивает первое (насосное) колесо, которое толкает рабочую жидкость ко второму (турбинному) колесу. Перемещающаяся жидкость поворачивает второе колесо, которое в конечном счете передает крутящий момент на колеса автомобиля. Жидкость передает усилие, потому что насосное колесо совершает работу над жидкостью, а сама жидкость совершает работу над турбинным колесом.

Особую ценность этому своеобразному непрямому сцеплению придает то, что потери мощности не происходит, даже если два колеса вращаются с совершенно разными скоростями. Когда машина останавливается на красный свет, второе колесо перестает вращаться и рабочая жидкость уже не может совершить над ним никакой работы. На второе колесо может действовать большой крутящий момент, но оно не вращается (см. с. 211, чтобы вспомнить, что работа совершается, если тело под воздействием вращающего момента поворачивается на некоторый угол). Рабочая жидкость перестает циркулировать, и первое колесо легко прокручивается, забирая от двигателя очень незначительное количество энергии.

Когда вы трогаете автомобиль с места, второе рабочее колесо начинает поворачиваться и постепенно вращается все быстрее, пока не достигает примерно такой же угловой скорости, как первое рабочее колесо. В это время энергия эффективно передается с первого колеса на второе, и автомобиль плавно разгоняется. Автоматическая коробка передач производит меньше рывков и толчков, чем механическая.

Коробка передач при автоматической трансмиссии управляется гидромеханическим способом. Рабочая жидкость так сжимает вместе фрикционные диски, что они не дают проворачиваться отдельным частям трансмиссии. Используются сложные наборы шестерен, так что остановка одной шестерни передает крутящий момент другим. Специализированные устройства автомобиля определяют скорость и выбирают, какие фрикционные диски должны быть сжаты и какие — разжаты. Эти диски регулируют относительную скорость вращения между валом, передающим крутящий момент в автоматическую трансмиссию, и валом, получающим крутящий момент на выходе из нее.

Некоторые автоматические трансмиссии совмещают функции гидравлической муфты и коробки передач в одном гидравлическом механизме — гидротрансформаторе. Гидротрансформатор (преобразователь крутящего момента) состоит из гидромуфты, которая включает два различных по форме колеса. Первое колесо быстро вращается со скоростью вращения двигателя. Второе колесо вращается медленнее, но передает больший крутящий момент на колеса.

## Пуск двигателя

---

До сих пор мы изучали двигатель, который уже работает. Но как же он начинает работать? Автомобиль запускает двигатель с помощью электрического мотора, который называется стартер. Стартер крепится к двигателю рядом с зубчатым диском — маховиком. Маховик проворачивается, когда включается стартер, и наоборот. Единственная задача стартера — запустить двигатель; после того как двигатель заработал, стартер уже не нужен и отключается.

Когда вы заводите автомобиль, электромагнит перемещает зубчатое колесо на стартере таким образом, чтобы оно вошло в зацепление с маховиком. Электроэнергия от аккумулятора автомобиля направляется на стартер, и тот начинает вращаться (устройство электромотора мы рассмотрим в разделе 11.3). Стартер передает крутящий момент маховику, и маховик тоже начинает вращение.

Шестерня стартера имеет маленькие размеры, зато диаметр маховика большой. В результате стартер получает большое механическое преимущество, он быстро вращается и передает относительно небольшой крутящий момент маховику, маховик же вращается медленно, но передает огромный крутящий момент двигателю автомобиля. Хотя стартер проделывает всю необходимую работу по запуску двигателя, система шестерен позволяет ему совершать эту работу, используя небольшой крутящий момент, но большой угол поворота.

Когда цилиндры поочередно проходят через такт рабочего хода, они начинают работать устойчиво, и очень скоро двигатель уже действует самостоятельно. Теперь стартер может отключиться. Для этого электромагнит отсоединяет стартер от двигателя, отодвигая запускающую шестерню от маховика. Стартер при этом переходит в режим холостого хода.

## Дифференциал

---

Итак, мы проследили, как крутящий момент передается от двигателя через трансмиссию к приводному валу, и уже почти подошли к колесам.

Может показаться, что осталось только соединить вал с осью, на которой сидят оба ведущих колеса, однако существует серьезное препятствие для жесткого соединения обоих колес одной осью. При повороте автомобиля внутреннее колесо совершает более короткий путь по сравнению с внешним, поэтому внутреннее колесо должно вращаться медленнее, чем внешнее колесо. Если оба колеса имеют общую ось, они должны будут вращаться синхронно, что приведет к заносу, бесполезному растрачиванию энергии и износу покрышек. Чтобы решить эту проблему, в подвеске автомобиля используется сложный механизм на основе зубчатой передачи, который называется дифференциал. Колеса прикреплены к двум отдельным полуосям, а те, в свою очередь, соединяются с идущим от трансмиссии приводным валом в дифференциале. Крутящий момент от ведущего вала вращает четыре шестерни дифференциала, и две из этих шестерен затем управляют полуосями. Поскольку вал вращается, дифференциал заставляет вращаться одну или обе полуоси. При этом дифференциал позволяет одной полуоси вращаться быстрее, чем другой, — нужно лишь, чтобы сумма двух угловых скоростей была пропорциональна угловой скорости ведущего вала. В результате дифференциал передает одинаковые крутящие моменты на каждое колесо, вместо того чтобы позволить обоим колесам вращаться с одинаковой угловой скоростью.

Во время поворота дифференциал позволяет одному из колес вращаться медленнее другого. Передавая одинаковый крутящий момент каждому колесу, он не растрчивает энергию напрасно. Без дифференциала автомобилем было бы очень трудно управлять в повороте. К сожалению, у дифференциала есть также и отрицательные свойства. Если ваш автомобиль стоит одним колесом на льду и это колесо практически не имеет сцепления с поверхностью, только оно и будет вращаться, в то время как второе ведущее колесо останется неподвижным. Колесу, не имеющему сцепления с дорогой, почти не требуется крутящего момента, чтобы начать вращение, поэтому дифференциал будет проворачивать только его. На некоторых транспортных средствах, таких как тракторы, водитель может заблокировать или ограничить работу дифференциала таким образом, что оба ведущих колеса вынуждены будут вращаться в любой ситуации. Такие механизмы помогают машине выбраться из глубокого снега или грязи, но их обязательно нужно отключать на чистом асфальте.

## Колеса, подвеска и рулевое управление

---

Крутящий момент от двигателя достиг колес — но это еще не все. Водитель должен управлять автомобилем, и при этом он совершенно не хочет сидеть непосредственно на колесах, ощущая собственным телом каждый ухаб на дороге. Поэтому колеса соединены со сложной поддерживающей структурой, опорной конструкцией, которая подвешивает кузов автомобиля над осями колес и обеспечивает управляемость по меньшей мере для двух колес.

Во всех типах автомобилей подвеска выполняет одну и ту же функцию: поддерживает кузов на эластичных устройствах таким образом, чтобы водитель

и пассажиры как можно меньше ощущали неровности дороги. Подвеска также отвечает за гашение колебаний — если кузов автомобиля после наезда на выбоину еще минуту-другую будет раскачиваться вверх и вниз, то это не только неприятно, но и небезопасно.

Упругие устройства, которые используются в автомобильной подвеске, — это пружинные, листовые и пневматические рессоры, а также торсионы. Идея состоит в том, чтобы кузов автомобиля опирался на упругие устройства, а не непосредственно на колеса. Колеса поддерживают рессоры, а рессоры поддерживают кузов автомобиля. Во время сборки автомобиля кузов до некоторой степени сжимает рессоры, однако очень скоро система приходит в равновесие: подъемная сила, с которой рессоры действуют на кузов, точно уравновешивает его вес. Автомобиль приобретает устойчивое равновесие.

Каждый раз, когда колесо наезжает на камень, рессора, соединенная с этим колесом, сжимается. Затем рессора начинает действовать подъемной силой на кузов, кузов подается вверх. Но поскольку рессора передает вертикальное усилие постепенно и с умеренной силой, пассажиры избегают резкого толчка вверх. Колесо весит гораздо меньше, чем корпус автомобиля, поэтому гораздо быстрее реагирует на противодействие рессоры. Часто колесо возвращается в исходное положение еще до того, как кузов автомобиля заметно отреагировал на толчок. В этом случае пассажиры вообще почти ничего не замечают.

Если препятствие достаточно крупное, например высокий ухаб, тогда кузов автомобиля тоже должен податься наверх. Кузов будет подниматься вверх, пока не займет правильное положение над колесами.

Но к тому времени у кузова будет уже достаточно высокая скорость подъема, и по инерции он проскочит нужную высоту. В результате кузов колеблется вверх и вниз, как пружинные весы в магазине, если вы резко бросите на них тяжелый пакет с овощами.

Если бы подвеска состояла только из рессор, то кузов автомобиля во время движения непрерывно раскачивался бы. Но в состав подвески входят еще и амортизаторы. Эти механические устройства используют трение скольжения между поверхностями или вязкость жидкости, чтобы погасить колебания кузова автомобиля. Каждый раз, когда кузов автомобиля пытается перемещаться относительно колеса, амортизатор противодействует движению. Он поглощает избыточную энергию автомобиля — энергию подскока — и быстро приводит машину обратно в состояние равновесия. Если амортизаторы вашего автомобиля работают нормально, вы не сможете заставить автомобиль подпрыгивать. Когда амортизаторы отказывают, машина будет неоднократно подсакивать всякий раз, когда вы переедете ухаб или выбоину на дороге. Такое подпрыгивание может ухудшить силу сцепления колес с дорогой и снизить управляемость автомобиля.

Вы выбираете направление движения, поворачивая рулевое колесо. Это действие смещает оси, вокруг которых вращаются передние колеса. Автомобиль всегда будет пытаться следовать по траектории, которая позволяет колесам поворачивать без заноса. Когда вы поворачиваете руль влево, зубчатый механизм тоже поворачивает передние колеса влево: передняя часть каждого колеса оказывается левее, чем задняя. Колесо начинает вращаться и соприкасается с дорожным покрытием точкой, смещенной вперед и влево от середины шины. Затем по мере вращения колеса точка контакта смещается назад и вправо. Чтобы колесо в этой точке контакта не пробуксовывало, все колесо и автомобиль в целом должны приобрести ускорение и двигаться влево. Статическое трение (или трение покоя) в точке контакта обеспечивает силу, которая разгоняет машину влево и тем самым заставляет ее совершить поворот.

Конечно, если вы поворачиваете слишком быстро, точка контакта начинает проскальзывать. Статическое трение не успевает обеспечить достаточной для поворота силы до того, как начнется скольжение. От максимального статического трения между шинами и дорогой зависит, насколько быстро вы можете повернуть автомобиль. На обледенелой дороге быстро повернуть вообще невозможно. Как только колеса начнут скользить, между ними и дорогой останется только трение скольжения. Так как трение скольжения не зависит от того, куда направлены колеса, у вас будет очень мало возможностей контролировать направление движе-



ния. Автомобиль будет пытаться и далее двигаться по прямой, в то время как трение будет этому препятствовать. Вам нужно повернуть руль в направлении заноса так, чтобы колеса начали нормально вращаться и трение скольжения сменилось трением покоя. Как только статическое трение вернется, вы снова сможете управлять автомобилем.

## Тормоза

---

Подробно обсудив, как заставить автомобиль двигаться, пора узнать, как его остановить. Давайте изучим последнюю из оставшихся основных систем автомобиля — его тормоза. Автомобиль, как и велосипед, использует для остановки трение скольжения. Когда водитель нажимает на педаль тормоза, он приводит в движение поршень главного цилиндра тормозной системы. Тормозная жидкость выдавливается из цилиндра и по четырем отдельным трубкам проходит к четырем колесам. У каждого колеса сжатая тормозная жидкость толкает поршень колесного цилиндра. Движение поршня приводит тормозные колодки в контакт с металлической поверхностью вращающегося колесного диска.

Чем сильнее водитель давит на педаль тормоза, тем выше давление тормозной жидкости и тем больше сила, с которой колесный цилиндр действует на тормозные колодки. Так как сила трения скольжения примерно пропорциональна силе, прижимающей колодку к металлическому диску, сила торможения (тормозная сила) пропорциональна силе, с которой водитель давит на педаль тормоза. Выдавливание жидкости из одного цилиндра и дальнейшее ее использование для давления на поршень второго цилиндра часто применяется в гидравлических системах управления. Самолеты, строительные и промышленные машины содержат много таких механизмов. В целях безопасности главный цилиндр, как правило, на самом деле состоит из двух отдельных цилиндров — первый управляет тормозами на передних колесах, а второй — на задних. В этом случае, даже если один из цилиндров выходит из строя, половина тормозной системы будет продолжать работать.

Тормоза могут быть различных типов. В одном варианте тормозные колодки прижимаются к внутренней части барабана, который соединен с колесом. В другом — тормозная колодка прижимается к диску, связанному с колесом. В обоих случаях тормоза превращают кинетическую энергию автомобиля в тепловую энергию металла и колодки.

Удаление этой тепловой энергии очень важно для продолжения нормальной работы тормозов. При перегреве тормозная жидкость может закипеть, и тормоза перестанут функционировать. Дисковые тормоза в большей степени открыты для встречного потока воздуха, чем барабанные, поэтому более эффективно передают тепло в окружающий воздух. По этой же причине у дисковых тормозов отказ из-за перегрева менее вероятен по сравнению с барабанными. Тем не менее на длинном спуске, чтобы рассеять избыточную энергию автомобиля (гравитационную потенциальную энергию, которая при этом выделяется), лучше тормозить двигателем, а не тормозными колодками. Переключившись на более низкую передачу и позволив вращающемуся двигателю превращать избыточную энергию в тепло, которое выводится через радиатор и выхлопную систему, вы уменьшаете износ тормозных колодок и избегаете их возможного перегрева и даже отказа.

Многие современные автомобили оснащаются антиблокировочной системой торможения (АБС). Она служит для предупреждения пробуксовывания, так как позволяет колесам вращаться даже во время торможения. При использовании обычных тормозов силы трения между колодками и металлическими дисками могут стать настолько высокими, что колеса будут полностью заблокированы. В этом случае на покрышки внезапно начнет действовать трение скольжения с дорогой, что может привести к потере управления, повреждению шин и увеличению тормозного пути.

Пока колеса продолжают вращаться, статическое трение обеспечивает гораздо большую силу торможения, чем могло бы обеспечить трение скольжения. Дело в том, что сила, которую статическое трение создает для предотвращения про-

буксовывания колеса, гораздо больше, чем та, что создается трением скольжения для остановки колеса, которое уже буксует.

Антиблокировочная система анализирует вращение колеса и отпускает тормоза, если колесо вращается неправильно. Во время резкой остановки колеса продолжают вращаться таким образом, что между шиной и дорожным покрытием остается только статическое трение. Вся кинетическая энергия автомобиля превращается в тепловую энергию трения скольжения в тормозной системе — но не трения скольжения между дорожным покрытием и шинами! Когда ABS срабатывает, вы можете почувствовать, как система регулирует силу торможения, чтобы колеса продолжали вращаться. Стоит при случае поэкспериментировать с антиблокировочной системой, чтобы знать, чего от нее ожидать, когда она понадобится по-настоящему.

## Аэродинамика автомобиля

Даже на ровной дороге автомобиль не может долго двигаться по инерции. Мотор должен продолжать работать, чтобы двигать машину вперед, вопреки замедляющему влиянию трения и сопротивления воздуха. Основной формой сопротивления воздуха, которую испытывает автомобиль, является сопротивление давления. Как и мяч, который движется через воздух на рис. 6.2.5, движущийся вперед автомобиль оставляет за собой турбулентный след в воздухе, передавая этому воздуху значительную часть инерции.

При проектировании автомобиля важной задачей является минимизация турбулентного следа. Плавные, обтекаемые аэродинамические очертания имеют большее значение для автомобилей, которые предназначены для того, чтобы мчаться по скоростным автострадам или участвовать в автогонках (рис. 8.2.5), чем для тех, которым в основном предстоит ездить по загруженным городским улицам, то и дело останавливаясь на светофорах (рис. 8.2.6). Тем не менее практически все современные автомобили, насколько это возможно, имеют обтекаемую форму. Обычно оценивают коэффициент лобового (или аэродинамического) сопротивления автомобиля: отношение поперечного сечения следа к величине физического поперечного сечения. Например, турбулентный след автомобиля с коэффициентом лобового сопротивления 0,3 составляет всего 30% от поперечного сечения автомобиля.

Но минимизация турбулентного следа — не единственная цель, ради которой автомобилю придаются аэродинамические очертания. Поскольку воздух, обтекающий автомобиль, описывает над крышей машины дугу в виде длинной нисходящей кривой, там обычно создается область относительно низкого давления. Так как давление воздуха под машиной примерно равно атмосферному, а над ней оно ниже атмосферного, то автомобиль в целом испытывает подъемную силу. И хотя этой силы, как правило, не хватает, чтобы оторвать автомобиль от земли, она компенсирует часть веса машины и, следовательно, уменьшает силы сцепления колес с дорожным покрытием. На высокой скорости силы сцепления могут настолько уменьшиться, что появляется опасность заноса при повороте или других резких ускорениях.

Чтобы противостоять этой подъемной силе и повысить сцепление с дорогой, в некоторых автомобилях предусмотрены спойлеры (рис. 8.2.7) — антикрылья, предназначенные для увеличения прижимной силы от воздушного потока. Отклоняя воздушный поток вверх, спойлер получает направленную вниз силу, которая прижимает автомобиль к дороге и улучшает сцепление с асфальтом.

У многих гоночных автомобилей в том или ином виде имеется эта конструкция, способная обеспечить огромную прижимную силу. Часто эта сила даже превышает вес автомобиля. Сцепление гоночного болида с покрытием настолько велико, что он мог бы ездить по потолку, если бы только существовал соответствующий способ старта и остановки!

Но спойлеры, приделанные над багажниками самых обычных автомобилей, относительно неэффективны. Иногда они настолько небрежно спроектированы или установлены, что, создавая ничтожную прижимную силу, значительно усиливают сопротивление воздуха. Вместо того чтобы удерживать машину на дороге, они в конечном счете увеличивают расход топлива, не говоря уже об ухудшении обзора через заднее стекло!



Рис. 8.2.5. Этот автомобиль специально спроектирован таким образом, чтобы минимизировать коэффициент лобового сопротивления. Он испытывает относительно небольшое воздушное сопротивление даже на высоких скоростях.



Рис. 8.2.6. Этот автомобиль предназначен для городского режима движения, и ему требуется совсем немного места для парковки. Зато у него относительно высокий коэффициент лобового сопротивления.



Рис. 8.2.7. Спойлер (антикрыло) этого гоночного болида представляет собой тщательно рассчитанную конструкцию со сложным профилем, которая отклоняет воздушный поток вверх, но при этом не испытывает ненужных дополнительных сил сопротивления. Спойлер создает совершенно незначительный турбулентный след, зато развивает огромную прижимную силу, чтобы улучшить сцепление автомобиля с дорогой.

## Паровые машины

Двигатель внутреннего сгорания, который используется в автомобилях, был изобретен во второй половине XIX века, и его можно считать потомком старинных двигателей внешнего сгорания, то есть таких тепловых машин, в которых топливо сжигается за пределами самого двигателя. Классический двигатель внешнего сгорания — паровая машина, которую в 1763 году усовершенствовал и сделал практически применимой шотландский изобретатель Джеймс Уатт (1736–1819).

Котел паровой машины, разогреваемый огнем топки, кипятил воду для получения пара высокого давления. Этот горячий пар переносит тепло в холодный окружающий воздух и по пути совершает работу над движущейся поверхностью. К тому времени, когда пар выходит из машины, часть его тепловой энергии уже преобразована в упорядоченную энергию. Паровые машины приводили в движение не только первые самодвижущиеся экипажи, но и пароходы и паровозы, а паровые турбины до сих пор используются на электростанциях. Разумеется, современные автомобили давно уже отказались от паровых двигателей в пользу двигателей внутреннего сгорания.

## Вечный двигатель

Вечный двигатель — это машина, которая пребывает в постоянном равномерном движении и, как правило, с выделением некоторого количества упорядоченной энергии. При этом вечный двигатель не должен иметь никаких внешних источников упорядоченности, и он не может передавать тепло из горячей области в холодную. Последние два ограничения необходимы, потому что без них создать постоянно движущуюся систему не представляет никаких трудностей — достаточно, например, подключить ее к электричеству или использовать паровую машину, действие которой основано именно на передаче тепла.

Несмотря на то что некоторые люди упорно продолжают изобретать вечный двигатель, в частности такой, который мог бы служить неиссякаемым источником упорядоченной энергии, они никогда не добьются успеха. Такое устройство должно было бы производить работу либо из ничего, либо только из тепловой энергии. Создание работы из ничего действительно невозможно; энергия — неизменная величина и не может быть создана или уничтожена. Чтобы машина могла производить работу, она должна откуда-то получать энергию. Это первый закон термодинамики. Если кто-то пытается продать вам двигатель, который вообще не нуждается в топливе и создает работу из ничего, — не верьте! Это обман и мошенничество!

Что касается машин, которые полностью превращают тепловую энергию в работу, то существование таких устройств тоже невозможно, но уже по другой причине: они не нарушают закон сохранения энергии, но нарушают второй закон термодинамики. Тепловая энергия — неупорядоченная, она случайным образом

распределяется между отдельными атомами и молекулами тела, поэтому ее нельзя просто собрать и перераспределить для совершения полезной работы. Когда сгорает свеча, вся энергия, которой свеча когда-то обладала, все еще находится в комнате, но ее гораздо труднее использовать. Так же как чашка кофе гораздо полезнее до того, как вы ее разобьете, чем после, так и энергия гораздо полезнее до того, как вы впесете в нее беспорядок.

Трудность повторного “собираания” тепловой энергии для выполнения полезной работы имеет статистическую природу: очень маловероятно, что эта энергия сама перераспределится в упорядоченной форме, так же как исчезающе мала вероятность того, что разбитая чашка сама собой правильно соберется в целую. Законы механики не запрещают этих преобразований, однако их вероятность чрезвычайно мала. Это второй закон термодинамики. Приходилось ли вам когда-нибудь бросать на пол осколки уже разбитой чашки? Часто ли случалось, чтобы осколки во время падения собрались вместе? Поэтому если кто-то попытается продать вам двигатель, который использует тепловую энергию окружающей среды в качестве “топлива”, то есть полностью превращает тепло в работу, — не верьте! Это тоже мошенничество.

Одним словом, надо понимать, что в мире есть запас разбросанной повсюду упорядоченности, и двигатель, который потребляет этот порядок, должен работать в соответствии с законами термодинамики. То есть это НЕ вечный двигатель. Бепзиновый бак, новый аккумулятор и свежий пончик с повидлом — очевидные примеры порядка, они легко могут быть использованы для работы двигателей (здесь я трактую термин “двигатель” очень широко, он включает все, что может потреблять порядок и использовать его для выполнения работы). Но и полный стакан воды в жаркий день, теплый камень, на котором можно согреться прохладным вечером, груда собранных граблями листьев — все это также обладает запасом порядка и, в принципе, может быть использовано для питания двигателей и совершения работы.

Живые организмы, особенно бактерии, фантастически преуспели по части потребления любых самых крошечных кусочков порядка, какие только могут найти. Если где-то существует хоть какая-то упорядоченность, то можете быть уверены — некие существа уже сообразили, как ее использовать. Мы, люди, — ужасные и неразумные потребители порядка, мы бессмысленно расточаем драгоценные ресурсы и оставляем после себя горы неупорядоченных, обладающих высокой энтропией отходов. Но многие другие существа очень бережно и экономно используют порядок, который находят вокруг себя.

---

## 8.3 Атмосфера

Атмосфера не только снабжает нас кислородом для дыхания. Газовый слой вокруг Земли помогает поддерживать температуру поверхности планеты и защищает человечество как от космического мусора, так и в некоторой степени от ультрафиолетового излучения Солнца. Благодаря атмосфере жизнь на поверхности Земли имеет динамический характер — в атмосфере формируется погода, происходит круговорот воды, образуется ветер. В этом разделе мы рассмотрим происхождение и свойства этих природных явлений.

### Температура Земли и парниковый эффект

Если оставить в стороне небольшие вариации, связанные с временем суток, временем года и географическим положением, средняя температура земной поверхности составляет примерно  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Когда в Северной Америке ночь, в Азии день, и наоборот. Когда в Северном полушарии зима, в Южном — лето, и наоборот. В результате мы получаем усредненное значение.

Чтобы поддерживать температуру поверхности постоянной, необходим тепловой баланс. Если бы преобладало поступление тепла, то средняя температура земной поверхности неуклонно росла бы. Если бы с поверхности удалялось больше тепла, чем поступает на нее, — понижалась бы. Средняя температура поддерживается на уровне  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  благодаря тому, что планета избавляется от тепла с той же скоростью, с какой это тепло поступает. Таким образом, запас тепловой энергии никогда не меняется.

Главный источник тепла для Земли — Солнце. Его тепло достигает Земли главным образом в виде электромагнитного излучения (рис. 8.3.1). Температура солнечной поверхности — около  $5500\text{ }^{\circ}\text{C}$ , поэтому солнечное излучение состоит главным образом из видимого света, хотя включает также значительные доли инфракрасного и ультрафиолетового излучений. Суммарная мощность солнечного излучения, достигающего Земли, составляет  $1,73 \times 10^{17}$  Вт, или  $1,73 \times 10^{17}$  Дж тепла каждую секунду. Для сравнения: суммарное производство электрической энергии в мире составляет примерно  $3 \times 10^{12}$  Вт.

Несмотря на то что земная поверхность и атмосфера отражают около 34% солнечного света, остальную часть они поглощают и, следовательно, столько же должны испустить в темное пустое космическое пространство, окружающее Землю. Поскольку земная поверхность и атмосфера гораздо холоднее, чем Солнце, они испускают главным образом инфракрасное излучение (рис. 8.3.1). Чтобы Земля могла излучать  $1,73 \times 10^{17}$  Вт тепловой энергии в виде инфракрасного излучения, температура ее поверхности должна составлять примерно  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Если бы у нашей планеты не было атмосферы, то источником теплового излучения была бы земная поверхность и ее средняя температура действительно была бы равна  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  или около того. Однако у Земли есть атмосфера. Прозрачная для видимого света, она довольно хорошо поглощает и испускает инфракрасное излучение. В результате главным источником теплового излучения Земли является не ее поверхность, а именно атмосфера! Эффективный источник земного теплового излучения расположен на высоте примерно 5 км, а средняя температура атмосферы на этой высоте как раз и составляет  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Это смещение зоны активного излучения от уровня поверхности Земли в верхние слои атмосферы приводит к парниковому эффекту. Так как земная поверхность почти не участвует в излучении тепла, ее температура не должна быть  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ . А поскольку атмосфера создает естественный градиент температуры около  $-6,6\text{ }^{\circ}\text{C}$  на каждый километр высоты, температура земной поверхности, находящейся на 5 км ниже излучающей поверхности атмосферы, и должна быть примерно на  $33\text{ }^{\circ}\text{C}$  горячее, то есть  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Понижение температуры атмосферы с ростом высоты (которое мы скоро разберем подробнее) объясняется расширением воздуха в области пониженного давления, в которую попадает поднимающийся воздух. Здесь он расширяется, его давление и, соответственно, его температура падает. Присутствие влаги ослабляет этот эффект, но температура атмосферы все равно уменьшается примерно на  $6,6\text{ }^{\circ}\text{C}$  на километр.



Рис. 8.3.1. Большую часть теплового излучения, испускаемого раскаленным до  $5500\text{ }^{\circ}\text{C}$  Солнцем, составляет видимый свет, который относительно легко проходит через атмосферу к поверхности Земли. Однако тепловое излучение Земли в основном состоит из инфракрасного излучения и испускается главным образом атмосферой. Тепловое излучение Земли эффективно происходит на высоте около 5 км.

Так как жизнь при средней температуре  $-18^{\circ}\text{C}$  была бы нелегкой, мы должны быть благодарны парниковому эффекту. Тем не менее слишком сильный парниковый эффект может создавать проблемы. Если атмосфера станет еще более эффективно поглощать и излучать инфракрасное излучение, средняя высота источника теплового излучения будет смещаться вверх и температура на поверхности Земли будет расти. Мы хотели бы, чтобы эта высота по-прежнему оставалась на уровне около 5 км и не выросла бы до 6 км и более.

Насколько эффективно атмосфера поглощает и испускает инфракрасное излучение, зависит от ее химического состава. Молекулы азота и кислорода, составляющие в воздухе подавляющее большинство, прозрачны как для видимого, так и для инфракрасного света. А вот молекулы других газов, которых в воздухе гораздо меньше, хорошо поглощают и испускают инфракрасное излучение, поэтому они и называются парниковыми газами. Несмотря на то что главным парниковым газом является водяной пар, другие газы, например углекислый газ и метан (природный газ), также имеют значение. Чем больше таких газов в атмосфере, тем выше может подняться эффективный уровень, с которого происходит тепловое излучение, и тем выше будет температура земной поверхности.

В настоящее время нарастает уверенность, что перепроизводство парниковых газов, в частности углекислого, вызывает быстрое потепление и изменения климата на планете. Но спор продолжается, так как парниковый эффект является лишь одним из влияющих на климат факторов, и поскольку неопровержимых научных доказательств в пользу той или иной стороны пока нет, политические и коммерческие интересы продолжают доминировать и в глобальной, и в национальных дискуссиях. Тем не менее многие ученые встревожены имеющимися свидетельствами глобального потепления и считают, что продолжающееся производство парниковых газов в результате человеческой деятельности — серьезная угроза для будущего благополучия человечества (о том, как можно отследить изменения в составе воздуха, см. ❶).

❶ Определить, в каких количествах углекислый газ и другие компоненты присутствовали в воздухе много лет назад, — трудная задача. Ученые ищут образцы воздуха внутри предметов, которые были герметично запечатаны в определенное время в прошлом. Одним из таких объектов исследования стали пуговицы от военной формы. Исследования показали, что содержание углекислого газа в атмосфере медленно, но неуклонно растет с начала Промышленной революции.

## Прогревание воздуха и образование ветра

Способность воздуха поглощать инфракрасное излучение не только повышает среднюю температуру земной поверхности. Она также позволяет земле передавать тепло в атмосферу. Поскольку воздух — плохой проводник тепла, очень небольшое количество последнего передается путем прямого контакта земли с воздухом. Основным механизмом нагревания воздуха — тепловое излучение от поверхности Земли. Инфракрасное излучение поглощается содержащимися в воздухе парниковыми газами, и воздух становится теплее. Так как главный парниковый газ — это водяной пар, концентрирующийся вблизи поверхности, нижние слои атмосферы прогреваются эффективнее, чем верхние.

Из-за того, что воздух прогревается снизу вверх, на него сильно влияет температура земной поверхности. Влажный воздух над горячим обширным участком воды или суши поглощает большое количество тепла, в то время как сухой воздух над холодным участком поглощает относительно мало тепла. Эта разница в скорости нагрева и является причиной возникновения ветров.

Чтобы понять, как действует ветер, представим себе воздух над ровным участком земной поверхности. Для начала вообразим, что температура поверхности везде одинакова (рис. 8.3.2, а). В этом случае воздух на восточном краю участка идентичен воздуху на западном. В каждой точке самый горячий воздух находится у поверхности Земли, и его температура постепенно снижается с увеличением высоты. Давление воздуха имеет наибольшую величину у поверхности и постепенно уменьшается с высотой.

Итак, пока что никакого ветра нет, потому что нет горизонтального перепада давления. Существует перепад по вертикали, но он служит только для поддержания веса воздуха: если бы не разница давлений по высоте, атмосфера бы просто “схлопнулась”. Но разница давлений по горизонтали должна была бы вызывать движение воздуха в сторону низкого давления. Это и создавало бы ветер.

Теперь представим, что восходит солнце и начинает согревать участок только с одной, восточной, стороны. Нагревшаяся земля быстро прогреет и воздух непосредственно над ней. Горячий воздух начинает расширяться, как в воздушном



**Рис. 8.3.2.** (а) Когда температура земли на разных участках одинакова, ветра нет. (б) Когда восточный участок нагревается, воздух над ним расширяется вверх. Высотный ветер начинает дуть в сторону более холодного участка. (в) Увеличившийся вес воздуха в западной части повышает давление на уровне земли и вызывает приземный ветер, который дует в сторону более теплой восточной части. Образуется конвективная ячейка.

шаре, и столб воздуха над восточной стороной становится выше. Так как вес этого столба не изменился, давление воздуха на землю остается прежним. Но вследствие роста столба воздуха давление уже не так быстро уменьшается с увеличением высоты. Так как воздух и его вес поднимаются вверх (и та же самая масса воздушного столба распределяется теперь на большую высоту), градиент давления, связанный с ростом высоты, также смещается вверх.

В результате возникает горизонтальный перепад давления (**рис. 8.3.2, б**). На большой высоте воздух над теплой восточной стороной участка имеет более высокое давление, чем воздух на той же высоте над более холодной западной стороной. Высотный воздух начинает перемещаться в западном направлении. Можно сказать, что более высокий столб воздуха над теплой землей старается уменьшить свою высоту, распространяясь в сторону более низкого столба над холодной землей. Высотный ветер начинает дуть с востока на запад.

Но этот ветер уменьшает вес воздуха над теплой восточной стороной и увеличивает вес воздуха над холодной западной. В результате начинает меняться давление воздуха у поверхности земли. По мере того как растет вес воздуха над холодной западной стороной, растет и его приземное давление, потому что для поддержания увеличившейся массы воздушного столба необходимо более высокое давление. Аналогичным образом приземное давление в восточной части участка понижается, потому что ему нужно поддерживать меньший вес воздуха.

Теперь вблизи поверхности земли начинает дуть второй ветер. Этот приземный (или поверхностный) ветер, вызванный перепадом давления на уровне земли, дует из холодной западной части в теплую восточную. Итак, возникают два ветра: первый, на большой высоте, направлен от теплой стороны в холодную, и второй, непосредственно над землей, направлен от холодной стороны в теплую. На определенной средней высоте ветра вообще нет.

Эти два противоположно направленных ветра создают движение воздуха вверх над теплой областью и движение воздуха вниз над холодной, так что возникает непрерывная циркуляция воздуха. Частица воздуха, начавшая путь от поверхности восточной части, поднимается вверх, потом летит на запад, потом вниз и, наконец, на восток — и так до бесконечности. Ветер — это просто горизонтальный вариант гигантской конвективной ячейки.

Таким образом, мы снова говорим о конвекции (см. раздел 7.1), но теперь уже в масштабе атмосферы. Воздух поднимается от теплой земли вверх, затем движется в ту или иную сторону, унося тепло от более горячей земли и передавая его где-то в другом месте более холодной. Воздух, поднявшийся вверх над теплой землей, замещается потоком холодного воздуха, постоянно поступающим из окружающих областей. Как и всегда, тепло перетекает из более теплой области земной поверхности в более холодную; перенос тепла осуществляется конвекцией.

Ветер часто содержит большой запас кинетической энергии, которую можно с пользой применять: например, молотить зерно или производить электроэнергию. Энергия ветра происходит от тепла более горячего участка атмосферы, которое превращается в работу в процессе конвекции. Атмосфера работает как тепловая машина, которая передает тепло от горячей области земной поверхности более холодной, при этом преобразуя небольшую часть этого тепла в работу. Как всегда, второй закон термодинамики ограничивает количество тепла, которое может быть превращено в работу: в лучшем случае ветер может преобразовать в упорядоченную энергию лишь около 3% тепла, которое он несет. Однако это все равно

огромное количество энергии, и мы только учимся использовать ее в практических целях.

Перепад давления, вызывающий приземный ветер, можно измерить с помощью барометра. Определяя давление вблизи уровня земли, барометр помогает предсказать, в какую сторону будет дуть ветер и даже какую погоду он принесет. Как мы уже говорили, растущий воздушный столб над теплой областью земной поверхности, как правило, имеет пониженное давление на уровне земли (мы называем его “низким”). И наоборот, сжатый воздух над холодной областью обычно имеет повышенное по сравнению с нормальным (“высокое”) давление. Зная, где находятся области высокого и низкого давления, можно предсказать направление ветра, потому что приземный ветер дует из области высокого давления в область низкого.

Как мы уже отмечали, обсуждая парниковый эффект, температура воздуха изменяется, когда он опускается или поднимается. Опускающаяся (нисходящая) порция воздуха сжимается под давлением увеличившейся массы воздуха над ним. Так же как и в автомобильном двигателе (раздел 8.2), для сжатия воздуха требуется совершить работу, результатом которой является нагревание воздуха. Когда работа над нисходящей порцией воздуха совершена, его температура повышается. В земной атмосфере температура сухого воздуха повышается примерно на 10 °C на каждый километр снижения. Точно таким же образом порция поднимающегося (восходящего) сухого воздуха расширяется и совершает работу над лежащим выше воздушным слоем. Его температура падает примерно на 10 °C на каждый километр подъема. Изменение температуры влажного воздуха несколько меньше — около 6–7 °C на километр. Эти температурные изменения играют особенно важную роль, когда речь идет о ветрах, которые дуют с гор вниз и поэтому нагреваются во время снижения.

Дневные или суточные изменения температуры приводят к возникновению периодических ветров. Например, ежедневные циклы нагревания и охлаждения суши и воды в районе морского побережья вызывают бризы, которые дуют с суши или с моря. Земля нагревается быстрее, чем вода, поэтому утром морской бриз дует от прохладной воды к теплой земле. Ночью земля остывает быстрее воды, и континентальный бриз дует с прохладной земли в сторону более теплой воды.

Горно-долинные ветры обусловлены аналогичными явлениями. С восходом солнца вначале согреваются горы, и долинный ветер обдувает склон горы. На закате первыми остывают горы, и горный бриз дует вдоль склона горы в теплую долину. Похожим сезонным эффектом объясняются муссоны (см. ❷).

## Относительная влажность и погода

Относительная влажность — один из решающих факторов для погоды. Дождь возникает, когда теплый, влажный воздух охлаждается до точки, в которой его относительная влажность превышает 100%. Воздух может охлаждаться при контакте с более холодным воздухом или при движении вверх и расширении. Поэтому, когда горячие и холодные воздушные массы сталкиваются или когда теплый, влажный воздух поднимается в горы и там остывает, часто идут дожди. Дожди также часто случаются на границах горячих либо холодных погодных фронтов и на наветренных склонах гор.

И наоборот, воздух, который ветер несет вниз вдоль склона горы, становится теплее, и его относительная влажность падает. Такие нисходящие ветры называются кatabaticкими или стоковыми, они очень сухие и теплые. Примерами могут служить ветры чинук, дующие к востоку от Скалистых гор, и ветры Санта-Ана в Южной Калифорнии. Чинук славится тем, что под его воздействием чрезвычайно быстро тает и испаряется снег; ветры же Санта-Ана стали причиной многих катастрофических пожаров в зарослях чапарала между Лос-Анджелесом и Сан-Диего.

Еще один способ, которым водяной пар и влажность влияют на погоду, — создание запасов энергии. Водяной пар содержит огромное количество химической потенциальной энергии — энергии, которая высвобождается, когда газообразные молекулы воды связываются друг с другом, чтобы образовать жидкую воду. Эта скрытая теплота парообразования является важным источником энергии, который питает грозы и ураганы. Когда водяной пар конденсируется внутри одного из этих образований, он выделяет скрытую теплоту парообразования и нагревает

❷ Муссоны порождаются сезонными колебаниями морского бриза. Летнее прогревание земли в Восточной Азии порождает гигантские морские бризы, которые заносят влажный воздух от окружающих океанов далеко в глубь материка. В результате большая часть лета приходится на сезон дождей.



ет окружающий воздух. Воздух расширяется и движется вверх. Таким образом, конденсация воды ведет к нагреванию, а оно, в свою очередь, — к образованию внутри урагана грозных восходящих потоков.

## Глобальные ветры и силы Кориолиса

С глобальными ветрами все обстояло бы просто, если бы не вращение Земли. Поскольку солнце нагревает землю и воду в районе экватора сильнее, чем в районе полюсов, существовали бы устойчивые тепловые ветры, направленные от экватора к полюсам и обратно (рис. 8.3.3). Высотные ветры дули бы от горячего экватора в сторону холодных полюсов, а приземные возвращались бы от холодных полюсов к горячему экватору. Над экватором всегда существовала бы область низкого давления, а над обоими полюсами — высокого.

Но Земля вращается, и ее вращение усложняет пути глобальных ветров. Проблема связана с силами Кориолиса: так как Земля вращается, траектория тела, свободно движущегося по ее поверхности, кажется кривой. На самом деле на тело не действуют никакие горизонтальные силы, и оно движется по прямой. Тем не менее вращающаяся Земля является неинерциальной (т. е. движущейся с ускорением) системой отсчета, и прямая линия в такой системе может не выглядеть прямой.

Чтобы понять, что такое силы Кориолиса, представьте, будто вы с приятелем играете в мяч на карусели (рис. 8.3.4). Ваш друг стоит ближе к центру карусели. Если карусель неподвижна, вы без труда можете перебрасываться мячом (рис. 8.3.4, а): вы просто целитесь друг в друга и бросаете мяч. Однако если карусель вращается против часовой стрелки, вам будет очень трудно бросить мяч так, чтобы ваш друг с легкостью его поймал. Если вы будете целить прямо в него, то промахнетесь (рис. 8.3.4, б). Так как в момент броска вы участвуете во вращении вместе с каруселью, вы невольно придаете мячу боковое ускорение. Ваш друг тоже смещается в сторону, но медленнее, чем вы, потому что вы дальше от центра карусели. В результате мяч полетит правее вашего друга. Со своей точки зрения, стоя на вращающейся карусели, вы увидите, что траектория мяча отклонилась вправо (рис. 8.3.4, в).

Искривленная траектория мяча — результат того, что вы находитесь в неинерциальной системе координат. В действительности же мяч летит по прямой, а "искривляетесь", то есть перемещаетесь по кривой, вы сами. Однако для вас это все равно выглядит так, будто мяч летит по кривой. Вы наблюдаете результат действия сил Кориолиса.

Сила Кориолиса также действует на тела, движущиеся относительно поверхности Земли. Поскольку Земля вращается на восток с угловой скоростью около  $15^\circ$  в час, то любое неподвижное относительно Земли тело вблизи экватора несется на восток с огромной скоростью  $1670 \text{ км/ч}^*$ . Когда вы перемещаетесь к северу или к югу от экватора, вы приближаетесь к оси вращения Земли, и эта скорость уменьшается. В районе полюсов, очень близко к оси вращения Земли, она почти равна нулю.



Рис. 8.3.3. Если бы Земля не вращалась, тепловые ветры распространялись бы от горячего экватора к обоим холодным полюсам. Высотные ветры дули бы в сторону полюсов, приземные — в сторону экватора.

\* Эта величина определяется суточным вращением Земли и равна длине экватора ( $40000 \text{ км}$ ), разделенной на длительность периода ее вращения ( $24 \text{ часа}$ ).

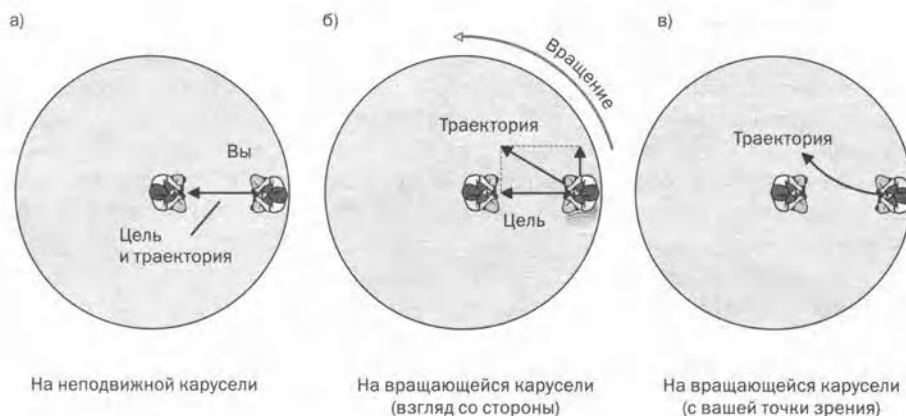
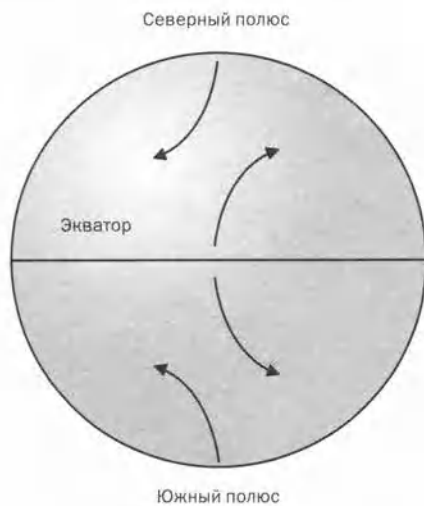


Рис. 8.3.4. (а) Если вы бросаете мяч приятелю, который стоит вблизи оси неподвижной карусели, то мяч движется по прямой и ваш партнер легко может его поймать. (б) Если карусель вращается против часовой стрелки, то мяч, посланный вашей рукой, приобретает некоторую боковую скорость и летит правее цели. (в) С вашей точки зрения (в вашей неинерциальной системе отсчета), мяч отклоняется по кривой вправо и не попадает в цель.



**Рис. 8.3.5.** Земля вращается на восток. В результате траектории движения тел в Северном полушарии кажутся изогнутыми вправо, а в Южном полушарии — влево.

\* Есть несколько версий происхождения этого морского термина. Одна из наиболее убедительных гласит, что матросы, получавшие жалованье частями в течение долгого плавания, еще до отплытия тратили первый аванс и оставались без денег до следующей выплаты. Этот период назывался "мертвой лошастью" (*dead horse*) и примерно совпадал с тем сроком, который требовался кораблю, вышедшему из английского порта, чтобы достичь субтропических широт и пересечь их.

Как и в примере с каруселью, если бросить мяч с экватора, целясь прямо в Северный полюс, мяч пролетит мимо. При броске в скорость тела входит направленный на восток компонент величиной 1670 км/ч, который заставляет мяч при движении на север к полюсу смещаться на восток относительно поверхности Земли под ним, которая будет двигаться все медленнее по мере перемещения мяча к северу. С точки зрения наблюдателя, стоящего на экваторе, тело смещается вправо (**рис. 8.3.5**).

Аналогичным образом мяч, брошенный с Северного полюса в направлении определенной точки на экваторе, также не попадет в нее. Полет начнется в отсутствие боковой скорости, поэтому чем дальше на юг, тем больше Земля под мячом начнет "выезжать" из-под него. По мере продвижения к экватору мяч будет смещаться к западу относительно движущейся со все большей скоростью Земли под ним. С точки зрения наблюдателя на Северном полюсе, мяч смещается вправо (**рис. 8.3.5**).

Итак, к северу от экватора траектория свободно движущегося в горизонтальном направлении тела всегда будет изогнута вправо, а к югу от экватора — влево. На самом экваторе сила Кориолиса отсутствует.

Теперь мы можем рассмотреть, как сила Кориолиса влияет на глобальные ветры. Воздух над экватором прогревается и поднимается вверх, вызывая высотные ветры, направленные к полюсам (**рис. 8.3.6**). По мере того как высотный ветер продвигается к северу от экватора, он смещается вправо. Вместо того чтобы двигаться прямо к полюсу, это воздушное течение изгибается в восточном направлении. Достигнув приблизительно 30° северной широты (треть пути к Северному полюсу), воздух уже движется почти прямо на восток. Этот направленный на восток высотный воздушный поток называется северным субтропическим струйным течением.

Воздух, которому не удается двигаться дальше к полюсу, скапливается над землей и создает северную субтропическую область высокого давления. Воздух в этой области высокого давления охлаждается, излучая тепло в космос, и опускается к земле. Оттуда он распространяется на юг, к экватору, и на север, к полюсу. Воздух, возвращающийся к экватору, вновь смещается вправо и начинает двигаться на запад. Эти восточные ветры, дующие между 30° северной широты и экватором, называются пассатами (**рис. 8.3.7**). Пассаты играли очень важную роль в эпоху парусников, потому что помогали кораблям добраться из Европы в Америку. На самом экваторе воздух поднимается, и там мало приземных ветров. Эту область называют экваториальной зоной затишья.

В субтропиках, в области высокого давления, на уровне примерно 30° северной широты, существует еще один район со слабыми приземными ветрами, который называют "конскими широтами" (*horse latitudes*)\* или субтропическим поясом затишья. Но приземные ветры снова усиливаются по мере того, как на малых высотах воздух движется на север к полюсу. Эти ветры также поворачивают вправо и создают дующие с запада на восток так называемые западные ветры умеренного пояса. В Северной Америке этот пояс простирается от Техаса до Канады. Несмотря на незначительные местные колебания, в целом западные ветры умеренного пояса дуют в восточном направлении, вызывают общее движение воздуха на восток и приносят погодные изменения.

Дующие на север приземные ветры не достигают полюса. Вместо этого они приблизительно на уровне 60° северной широты сталкиваются с движущейся на юг с полюса приземной воздушной массой, где вместе образуют приполярную область низкого давления. В этой области воздух поднимается вверх и формирует высотные ветры, которые дуют и на юг, к экватору, и к Северному полюсу. В целом между экватором и Северным полюсом существуют три конвективных цикла. Аналогичное трио конвективных циклов есть между экватором и Южным полюсом.

## Ураганы и циклоны

Благодаря силам Кориолиса и вращению Земли приземные ветры на нашей планете не перемещают воздушные массы непосредственно в область низкого давления. Траектория ветра искривляется относительно Земли и не попадает в эту

область. В Северном полушарии ветры отклоняются вправо и в конце концов закручиваются вокруг области низкого давления в вихри в направлении против часовой стрелки, как показано на рис. 8.3.8.

Перепад давления заставляет ветер стремиться влево, к области низкого давления, но сила Кориолиса увлекает его вправо, прочь от этой области. Эти два противоположных эффекта уравниваются, и ветер циркулирует по кругу вокруг области низкого давления. Циркуляция воздуха вокруг области низкого давления называется циклоном.

Когда холодный воздух проходит над теплым океаном, он нагревается и расширяется. Возникает высотный ветер, который уносит часть воздуха в сторону, и в результате формируется область низкого давления. По мере того как новые холодные воздушные массы, проходя над водой, стремятся заместить поднимающийся воздух, сила Кориолиса отклоняет входящий воздух и заставляет его циркулировать вокруг области низкого давления — образуется циклон.

В некоторых случаях циркулирующие ветры могут достичь огромной скорости и породить мощную бурю, которую мы называем ураганом. Ураганы образуются только при одновременном стечении нескольких достаточно редких обстоятельств.

Во-первых, ураган может сформироваться только над очень теплым океаном, когда толща воды глубиной не менее 50 м прогрета как минимум до 26–27 °С. Ураган — гигантская тепловая машина, и источником его тепла служит горячая вода. Чтобы шторм приобрел огромную энергию, вода должна быть готова передать очень большое количество тепла. Вот почему ураганы происходят в основном в конце лета.

Во-вторых, воздух над теплым океаном должен быть относительно холодным, чтобы та его часть, которая нагревается от водной поверхности, могла подняться на очень большую высоту. Воздух, достаточно теплый, чтобы пройти через слой более холодного воздуха над ним, называется нестабильным. Поднимаясь, этот воздух расширяется и охлаждается, поэтому он должен быть очень теплым, чтобы продолжать подъем.

В-третьих, поднимающийся над теплым океаном воздух должен быть очень влажным. Как отмечалось в разделе 7.2, влажный воздух выделяет тепло, когда пары воды конденсируются с образованием дождевых капель, и это дополнительное тепло помогает поднять воздух еще выше. Своей свирепостью ураганы и сильные грозы во многом обязаны энергии, выделяющейся при фазовых переходах воды из пара в жидкость или в лед.

Наконец, последнее: и приземные, и высотные ветры должны способствовать образованию урагана, иначе он рассеется, не успев набрать силу. На низких высотах прохладные ветры должны контактировать с теплой водой океана. Высотные ветры должны помочь унести прочь воздух, который поднимается через центр шторма.

Когда все эти условия соблюдены, образуется область необычайно низкого давления, из которой и рождается ураган. Воздух при приближении к области низкого давления разгоняется до огромных скоростей, но сила Кориолиса заставляет его в бесконечном вихре кружиться вокруг этой области. В центре урагана формируется спокойный “глаз”, защищенный от ветров все той же силой Кориолиса.

Обычный диаметр “глаза” — около 60 км. Вдоль его периметра возникают наиболее сильные ветры, образующие кольцо шириной в несколько километров. В самом “глазу” почти нет ветра, очень низкое давление, может быть даже сухо и лишь слегка пасмурно.

Вблизи центра урагана, но уже за пределами “глаза” воздух поднимается вверх, унося тепло от воды. В итоге этот воздух уносится в сторону в виде высотных ветров. На них также действует сила Кориолиса, и они слегка завихряются в направлении, противоположном завихрению приземных ветров. В Северном полушарии приземные ветры всегда закручиваются против часовой стрелки. В Южном полушарии закручивание происходит по часовой стрелке, потому что сила Кориолиса действует в противоположном направлении, чем в Северном. Вот почему ураган, зародившийся в одном полушарии, никогда не может пересечь экватор и оказаться в другом.

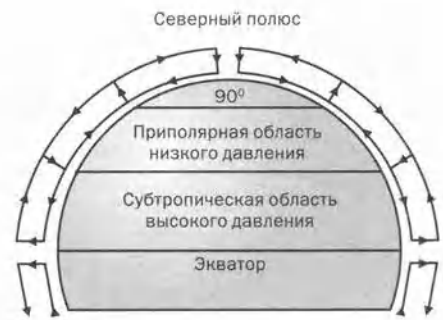


Рис. 8.3.6. Вследствие вращения Земли ветры Северного (и Южного) полушария разделяются на три группы. Конвективные потоки проходят между экватором и субтропической областью высокого давления на уровне около 30° северной широты; между этой же областью и приполярной областью низкого давления, расположенной на уровне 60° северной широты; и между приполярной областью низкого давления и Северным полюсом.



Рис. 8.3.7. Приземные ветры между областью высокого давления субтропиков и экватором обычно дуют на запад (пассаты), а между субтропической областью высокого давления и приполярной областью низкого давления — на восток (западные ветры умеренного пояса). Относительно спокойные зоны — это экватор и субтропическая область высокого давления (экваториальная зона затишья и “конские широты”).

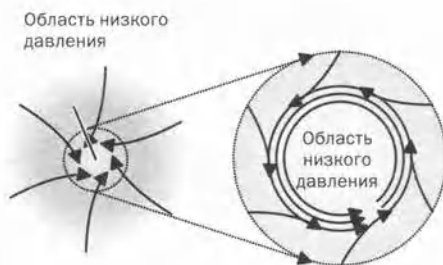


Рис. 8.3.8. В Северном полушарии ветер, направленный в область низкого давления, отклоняется вправо вследствие эффекта Кориолиса. В результате ветер циркулирует вокруг области низкого давления.

Содержание кислорода в атмосфере регулируется растениями. Растения используют процесс под названием фотосинтез для превращения углекислого газа и воды в углеводы и кислород. Углеводы — это большой класс соединений, от целлюлозы, которая придает растениям определенную форму, до глюкозы, которая обеспечивает растения (а также животных, питающихся этими растениями) энергией.

Из-за того что молекулы углеводов и кислорода обладают большей химической потенциальной энергией, чем молекулы углекислого газа и воды, из которых они образуются, растению нужна дополнительная энергия извне, чтобы совершить превращение. В процессе фотосинтеза эту энергию предоставляет солнечный свет.

Растения поглощают свет, используя яркие фотосинтетические пигменты, в частности зеленый хлорофилл. Эти соединения используют энергию света для осуществления химических реакций. По сути, фотосинтез — это процесс, противоположный горению. Но если сжечь древесину в кислороде с образованием воды и углекислого газа очень легко, то превратить с помощью световой энергии углекислый газ и воду в древесину и кислород гораздо сложнее. Тем не менее растениям удалось развить очень эффективный механизм этого “сгорания наоборот”. Без растений запасы кислорода в земной атмосфере быстро бы истощились. Большая часть усилий по сохранению и восстановлению лесов в мире связана со стремлением сохранить в атмосфере высокий уровень кислорода и низкий — углекислого газа.

Растения обладают способностью использовать световую энергию для возбуждения химических реакций частично благодаря тому, что свет испускается и поглощается отдельными порциями энергиями — фотонами. Каждый раз, когда растение поглощает фотон света, фотосинтетическое вещество выполняет действие по превращению углекислого газа и воды в углеводов и кислород. Энергия фотона зависит от длины волны света — длинноволновое инфракрасное излучение поглощается и излучается в виде небольших порций энергии, в то время как коротковолновое ультрафиолетовое излучение несет большие порции энергии. Видимый свет находится посередине и обладает энергией фотона, как раз подходящей для осуществления фотосинтеза.

Атмосферный кислород нужен для поддержания жизни и многих других процессов на нашей планете. Но он также играет важную роль как световой фильтр. Некоторые ультрафиолетовые фотоны солнечного света содержат так много энергии, что могут вызвать ожоги у растений и животных. Эти фотоны приводят к необратимым фотохимическим изменениям в поглотивших их молекулах, изменяют свойства белков (делают их неработающими) и могут вызывать такие биологические повреждения, как солнечный ожог и катаракта.

Ультрафиолетовые лучи могут даже повредить ДНК и РНК — молекулы, которые несут генетическую информацию и играют исключительную роль в синтезе белков и размножении. Если ультрафиолет вызывает значительные повреждения генетической структуры, клетка может погибнуть. Но может случиться так, что клетка не погибнет, а станет дефектной. Одним из возможных последствий в этом случае является рак.

Загар — это реакция кожи на фотохимическое воздействие, он обеспечивает некоторую защиту. Тем не менее ультрафиолетовый свет продолжает повреждать поглотившие его клетки кожи. Чтобы по-настоящему защитить кожу от ультрафиолетового облучения, необходимо пользоваться солнцезащитными кремами. Молекулы солнцезащитных средств поглощают ультрафиолет и превращают его в тепловую энергию. Очень незначительная часть излучения проникает через химический барьер и достигает кожи.

К счастью, сама атмосфера тоже защищает нас от облучения. Содержащиеся в ней молекулы кислорода поглощают большую часть самых высокоэнергетических ультрафиолетовых фотонов, так что очень малая часть жесткого ультрафиолетового излучения достигает земной поверхности. Поглотив дополнительный ультрафиолетовый фотон, молекула кислорода может распасться на два атома. Один из этих атомов кислорода может затем соединиться с другой молекулой кислорода с образованием молекулы озона. Озон — умеренно токсичная мо-

дификация кислорода с очень высокой реакционной способностью, по запаху и свойствам несколько напоминает хлор. Вблизи поверхности Земли озон можно считать загрязнителем и частью фотохимического смога. К счастью, озон быстро превращается в обычный кислород и не образует стойкого загрязнения. Благодаря сходству с хлором и его экологическим преимуществам, озон часто используют вместо хлора для обеззараживания воды, а также в качестве отбеливателя.

Но в верхних слоях атмосферы озон играет куда более важную роль. Молекулы кислорода поглощают только жесткое ультрафиолетовое излучение, оставляя Землю беззащитной перед менее опасными, несущими меньше энергии ультрафиолетовыми лучами. Однако молекулы озона поглощают и эти лучи. И хотя молекула озона после поглощения фотона может разложиться, по крайней мере один фотон уже не достигнет земной поверхности. Если бы в верхних слоях атмосферы не было озона, мы подвергались бы гораздо более сильному воздействию ультрафиолетового облучения и, соответственно, гораздо больше страдали от его последствий.

Молекулы озона непрерывно то возникают, то распадаются под влиянием ультрафиолетовых лучей. В верхних слоях атмосферы постоянно содержится количество озона, как раз достаточное для того, чтобы мы не получали чересчур больших доз ультрафиолета. Но, к сожалению, выделение в атмосферу хлорсодержащих молекул, ускорившееся с начала промышленной революции, нарушило этот хрупкий баланс. Атомы хлора действуют как катализаторы, ускоряя превращение озона в обычный кислород. Молекула озона обладает избыточной химической потенциальной энергией, поэтому две молекулы озона стараются превратиться в три молекулы кислорода. Единственное, что препятствует этой реакции, — недостаток энергии активации, необходимой для разрыва двух молекул озона, чтобы они могли затем образовать три молекулы обычного кислорода. Атомы хлора уменьшают энергию активации и тем самым облегчают процесс распада озона. Чем больше хлора попадает в верхние слои атмосферы, тем быстрее озон превращается в кислород и тем меньше его содержание в атмосфере.

Осознав угрозу, которую представляет сокращение количества озона, многие государства ограничили или запретили производство хлорсодержащих газов, таких как хлорфторуглероды. Тем не менее атомы хлора могут долго существовать в верхних слоях атмосферы, и один атом хлора может способствовать разложению огромного количества молекул озона. Чтобы полностью восстановить озоновый баланс, понадобится еще очень много времени.

---

## 8.4 ОЧИСТКА ВОДЫ

Пресная вода играет огромную роль в нашей жизни. Несмотря на то что питьевую воду можно получить из природных источников, довольно часто ее приходится получать из загрязненной или соленой морской воды. В некоторых странах, где дожди — редкость, опресненная морская вода становится главным источником питьевой. Любой процесс очистки воды сводится к отделению молекул воды от примесей: твердых, жидких и газообразных. В этом разделе мы рассмотрим некоторые процессы, которые позволяют осуществить это разделение.

### ДИСТИЛЛЯЦИЯ ВОДЫ

Один из простых способов очистки воды — дистилляция, или перегонка. Перегонкой называют общий метод разделения веществ. Вещество нагревают так, чтобы оно испарилось, затем эти пары конденсируют, чтобы образовалась смесь другого состава. Так как температуры испарения у разных веществ различны, соотношение веществ в конденсате изменяется по сравнению с исходной смесью. В некоторых случаях конденсат содержит практически только одно вещество — все остальные не выпариваются и остаются в исходной жидкости.

Чтобы понять, как можно очистить воду дистилляцией, вернемся к агрегатным состояниям воды. При любой температуре выше абсолютного нуля существует вероятность появления молекул пара над льдом или жидкостью. Эти молекулы получили достаточно тепловой энергии, чтобы покинуть лед или жидкость и превратиться в газ.

Если вы поместите некоторое количество воды в закрытый сосуд, вода будет испаряться до тех пор, пока в газовой фазе не накопится столько молекул, что они будут возвращаться в жидкую фазу так же часто, как и покидать ее. В этот момент две фазы, жидкая и газообразная, достигают фазового равновесия. Несмотря на то что молекулы непрерывно переходят из одной фазы в другую и обратно, ни одна фаза не увеличивается за счет другой, то есть суммарный эффект переходов равен нулю.

В состоянии фазового равновесия относительная влажность равна 100% — водяной пар достиг плотности насыщения. Этой плотности соответствует давление, которое называют давлением насыщенного пара. Давление водяного пара (насыщенного или нет) — это давление, обусловленное только молекулами воды. Например, если воздух при атмосферном давлении (101 300 Па) содержит 1% молекул воды, то давление водяного пара в этом воздухе составит 1% от общего давления, то есть 1013 паскалей. Если же при этом относительная влажность равна 100%, то давление насыщенного пара будет равно 1013 Па.

Но мы забыли о температуре. Поскольку плотность и давление насыщенного пара зависят от температуры, достигнутое соотношение между жидкостью и газом в нашем сосуде идеально только для данной температуры. Если вы нагреете сосуд, больше молекул воды будет переходить в газовую фазу, и количество жидкой воды уменьшится. Если вы охладите сосуд, больше молекул воды перейдет в жидкую фазу, и уменьшится количество пара. Эта взаимосвязь между температурой, плотностью и давлением насыщенного пара и лежит в основе дистилляции.

Что происходит, если в сосуде, помимо воды и водяного пара, имеется воздух? Как ни странно, воздух не имеет значения. Есть в сосуде воздух или нет — плотность и давление водяного пара останутся такими же. Это интересное явление позволяет производить перегонку как с воздухом, так и без воздуха, хотя присутствие воздуха влияет на общее давление, которое оказывается на воду, а следовательно — на температуру кипения. Технологии опреснения, которые мы рассмотрим ниже, лучше работают при давлении ниже атмосферного, поэтому во многих дистилляционных установках для уменьшения давления газа предусмотрено удаление воздуха.

Сколько водяного пара находится в сосуде? Давление насыщенного пара при обычной комнатной температуре 20 °С составляет примерно 2300 Па, или около 2% от атмосферного давления. Это означает, что при относительной влажности 100% около 2% всех молекул воздуха составляют молекулы воды. При 0 °С, тем-

пературе плавления льда, давление насыщенного пара составляет всего лишь 600 Па, или около 0,6% от атмосферного. То есть даже при замерзании в воздухе имеется некоторое количество влаги. Наконец, при 100 °С давление насыщенного пара составляет около 101 300 Па, или 100% атмосферного давления на уровне моря. Вот почему на уровне моря вода закипает при 100 °С.

Одновременное присутствие в сосуде и жидкой воды, и водяного пара означает, что фазы разделены. Каждая из фаз, жидкая и газообразная, занимает определенное место. Более плотная жидкая вода находится на дне сосуда, в то время как менее плотный пар поднимается вверх. Эти фазы могут находиться в равновесии в широком интервале температур. В принципе, существует всего одно сочетание температуры и давления — тройная точка воды, в которой жидкая вода, водяной пар и лед могут одновременно существовать в одном сосуде, находясь в состоянии фазового равновесия. Параметры тройной точки воды — температура 0,01 °С и давление 0,006 атм (611,657 Па).

Прежде чем углубиться в дистилляцию воды, давайте рассмотрим поведение некоторых других веществ, чтобы увидеть, чем они отличаются от воды. Ведь если бы они вели себя в точности как вода, то их невозможно было бы отделить от нее при помощи перегонки.

Поваренная соль (хлорид натрия) при комнатной температуре представляет собой твердое вещество. При атмосферном давлении она плавится только при 801 °С, а ее температура кипения составляет 1450 °С. Давление насыщенного пара соли при температурах ниже 500 °С настолько ничтожно, что им можно пренебречь. То есть если вы поместите кристалл соли в сосуд при температуре менее 500 °С, состоящие фазового равновесия будет достигнуто, когда почти все молекулы соли будут находиться в твердом состоянии и крайне малое количество — в газообразном (еще несколько интересных фактов о веществах описаны в ❶ и ❷).

Совершенно иначе дело обстоит с этиловым спиртом. Этиловый спирт вблизи уровня моря плавится при -112 °С и кипит всего при 78 °С. Несмотря на то что молекулы этилового спирта по размеру больше, чем молекулы воды, они не образуют столько водородных связей и их сравнительно легко разъединить. В результате спирт гораздо легче, чем вода, переходит в пар.

В процессах дистилляции эти различия в давлении паров используются для разделения веществ. Когда вы нагреваете смесь веществ до определенной температуры, вся смесь пытается достичь фазового равновесия. Вещества, которые при этой температуре существуют в газообразном состоянии, сосредоточиваются в газовой фазе. Вещества, которые при данной температуре являются жидкостями, — в жидкой. Когда через несколько минут наконец устанавливается фазовое равновесие, соотношение компонентов в газовой фазе может быть совсем другим, чем в жидкой.

Перегонка начинается, когда вы удаляете пар из горячей области в область с более низкой температурой. Теперь у нас есть две отдельные области с одним и тем же паром, и в каждой из них пар стремится достичь фазового равновесия. В холодной области некоторые молекулы пара конденсируются в жидкость, их замещают другие, испарившиеся в горячей области.

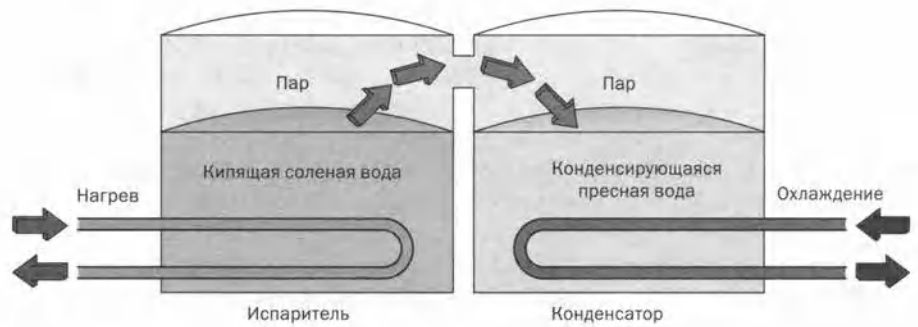
Конденсат содержит в основном те молекулы, которые легко испаряются в горячей области и легко конденсируются в холодной. Давление насыщенного пара этих молекул сильнее всего изменяется при переходе из горячей области в холодную. При той температуре, которая установилась в горячей области, они стремятся превратиться в газ, а при той, что в холодной, — в жидкость.

Теперь мы можем рассмотреть, как происходит опреснение воды при перегонке. Простая перегонная установка показана на рис. 8.4.1. Два отдельных сосуда — испаритель, в котором находится исходная соленая вода, и конденсатор, где собирается пресная, — делают общий газ, который свободно перемещается между ними. Так как молекулы соли при температурах, близких к комнатной, не переходят в газ, то газовая фаза представляет собой практически чистый водяной пар (воздух обычно удаляют заранее). В испарителе поддерживают высокую температуру, чтобы усилить парообразование. Конденсатор охлаждают, чтобы молекулам воды легче было перейти из газообразного состояния в жидкость. В итоге молекулы воды переходят из соленой воды в пресную.

Имея достаточный запас терпения, можно получить пресную воду из соленой при относительно небольшой разнице температур. Этой разницы температур

❶ При температурах, близких к комнатной, в воздухе редко можно обнаружить молекулы соли, однако бьющиеся о берег волны насыщают воздух каплями соленой воды. Эти капли испаряются, оставляя мельчайшие кристаллики соли, которые удерживаются во взвешенном состоянии силами сопротивления и придают океанскому воздуху соленый привкус.

❷ Азот, кислород и аргон при комнатной температуре независимо от давления остаются газами. Сжатие просто прижимает их молекулы одну к другой, не создавая при этом отдельной жидкой фазы. Чтобы сконденсировать эти газы, их нужно охладить до очень низких температур.



**Рис. 8.4.1.** Пресную воду можно получить при перегонке соленой воды. Когда соленую воду кипятят в одном из отсеков аппарата, получается практически чистый водяной пар. Затем этот пар конденсируется во втором, холодном отсеке и превращается в пресную воду.

должно хватать для того, чтобы молекулы воды переходили из соленой воды в пар, а затем конденсировались в пресную воду. Природа весьма терпелива и настойчива, поэтому, чтобы производить пресную воду, она использует очень небольшие разницы температур. Дождь, роса, иней — все эти явления происходят благодаря естественной конденсации. Когда стоит теплая погода, соленая вода испаряется; когда становится холоднее, образовавшиеся водяные пары конденсируются.

Может показаться, что даже крошечной разницы температур достаточно, чтобы осуществить перегонку, но это не так. Когда вы смешиваете соль с водой, то создаете беспорядок и повышаете энтропию. Разделение соли и воды уменьшает энтропию, и тут самое время вспомнить второй закон термодинамики. Если вы собираетесь разделить два вещества и при этом понизить энтропию, вы должны ее повысить где-нибудь в другом месте. В случае перегонки эта дополнительная энтропия возникает при перетекании тепла из горячей области в холодную. Разница температур между двумя областями должна быть достаточно существенной, чтобы суммарная энтропия не уменьшалась.

В промышленных системах дистилляции разницу температур обычно делают весьма значительной (в большинстве установок вода нагревается до кипения). Это не делает воду чище, но значительно ускоряет процесс. Водяные пары быстро конденсируются, если соприкасаются с очень холодной поверхностью. Молекулы воды быстро перемещаются из горячей части в холодную, так что опреснительная установка производит пресную воду гораздо быстрее, чем это происходит в естественных условиях. Но за это приходится платить: промышленные установки на каждый литр пресной воды потребляют во много раз больше упорядоченной энергии, чем природа.

Чтобы как-то снизить огромные энергозатраты, в мощных опреснительных системах используют различные технологические хитрости. Для ускорения перегонки воду нужно доводить до кипения, но на практике процесс проводят не при атмосферном давлении. Вместо этого из камеры испарителя откачивают воздух, поэтому вода закипает при более низкой температуре. Все остальное происходит так, как описано выше, за исключением того, что не нужно так сильно подогреть соленую воду. Конечно, производительность установки при этом несколько снижается, потому что уменьшается плотность пара, зато этот небольшой компромисс экономит много энергии.

Тем не менее для перегонки все равно требуется гораздо больше энергии, чем нам бы хотелось. Причина — скрытая теплота парообразования воды. С водяным паром из соленой воды уносится огромное количество тепла, которое передается пресной воде в процессе конденсации. Соленая вода становится холоднее, а пресная — теплее. При этом уменьшается разница температур и замедляется процесс перегонки. Чтобы поддерживать интенсивность перегонки, нужно постоянно подводить тепло к соленой воде и отводить его от пресной. Именно это нагревание и охлаждение делают процесс дистилляции таким дорогим.

Перенос тепла из испарителя в конденсатор, обусловленный скрытой теплотой парообразования, очень усложняет задачу. Второй закон термодинамики отнюдь не требует этого переноса как условия отделения воды от соли; это просто побочный эф-



фekt использования фазового перехода жидкость — газ для разделения двух веществ. Но, к счастью, при помощи некоторых ухищрений можно уменьшить потери тепла.

Самый удачный выход — повторно использовать это тепло. Как правило, одно и то же тепло используется несколько раз в разных аппаратах. В многокорпусных опреснительных установках корпуса работают при различных давлениях и температурах, поэтому тепло, выходящее из конденсатора с более высоким давлением, может быть использовано для подогрева воды в испарителе с меньшим давлением. Так как температура кипения воды зависит от давления, два корпуса могут работать при совершенно разных температурах.

Пример повторного использования тепла приведен на рис. 8.4.2. Вначале тепло дистиллирует воду в аппарате высокого давления, затем — в аппарате низкого давления. В первом тепло переходит из испарителя в конденсатор вместе с паром и затем уходит из конденсатора с охлаждающей водой. Охлаждающая вода, выходящая из аппарата высокого давления, на самом деле достаточно теплая, чтобы нагреть воду в аппарате низкого давления. В последнем тепло также переносится из испарителя в конденсатор и уходит вместе с охлаждающей водой второго аппарата. Это остаточное тепло рассеивается в окружающую среду.

В промышленных дистилляционных установках до выброса в атмосферу одно и то же тепло может использоваться пять и более раз. Источником тепла может быть солнечная энергия, обычное или ядерное топливо. В некоторых случаях используют тепловые отходы электростанций.

Процесс перегонки используется также для получения спирта. При естественном брожении нельзя получить спирт крепостью более 20%, потому что более высокие концентрации спирта смертельны для дрожжевых микроорганизмов, которые и вызывают брожение. Однако смесь воды и спирта можно перегнать, чтобы получить смесь с более высоким содержанием алкоголя. При комнатной температуре давление пара спирта гораздо выше, чем у воды, поэтому спирт кипит при более низкой температуре. Если при атмосферном давлении нагреть смесь воды

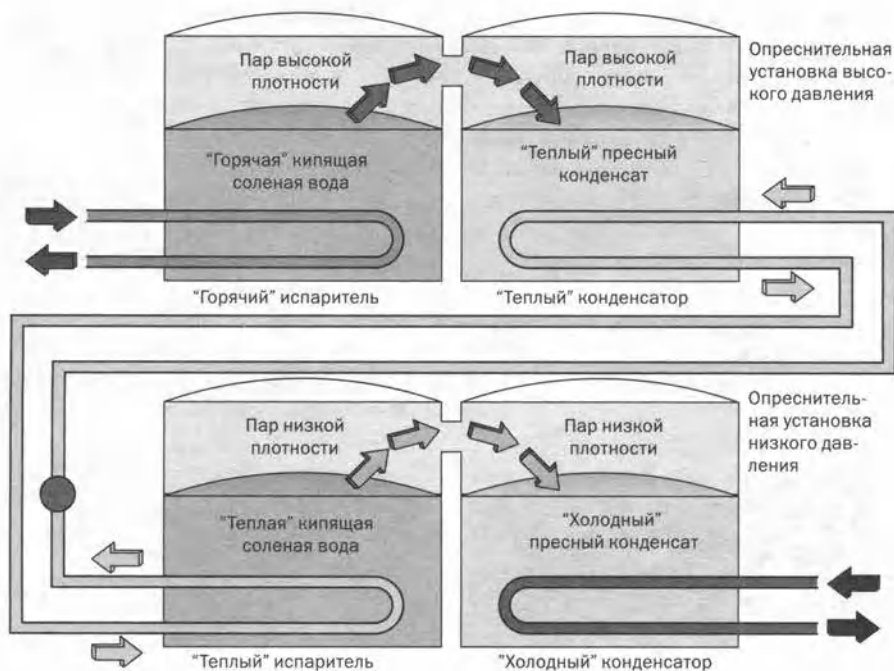


Рис. 8.4.2. Опреснение воды при атмосферном давлении требует огромного расхода тепла. Это тепло расходуется на нагрев воды до температуры 100 °С и затем на испарение ее молекул. Когда водяной пар вновь становится жидкостью в конденсаторе, происходит выделение тепла, которое сбрасывается вместе с охлаждающей водой. Однако в более экономичных конструкциях во втором аппарате применяют пониженное давление, что позволяет повторно использовать тепло, вышедшее из первого контура, для обогрева второго.

и спирта до кипения, пар над раствором будет состоять в основном из спирта. Если его сконденсировать, то в полученной жидкости может быть до 90% алкоголя.

## Замораживание пресной воды для получения соленой

Кипячение — не единственный фазовый переход, с помощью которого можно очищать воду. Лед, образующийся при замерзании морской воды, дает особенно чистую пресную воду — явление, которое эскимосы уже тысячи лет используют для получения питьевой воды. Явление это основано на балансе между энергией и беспорядком.

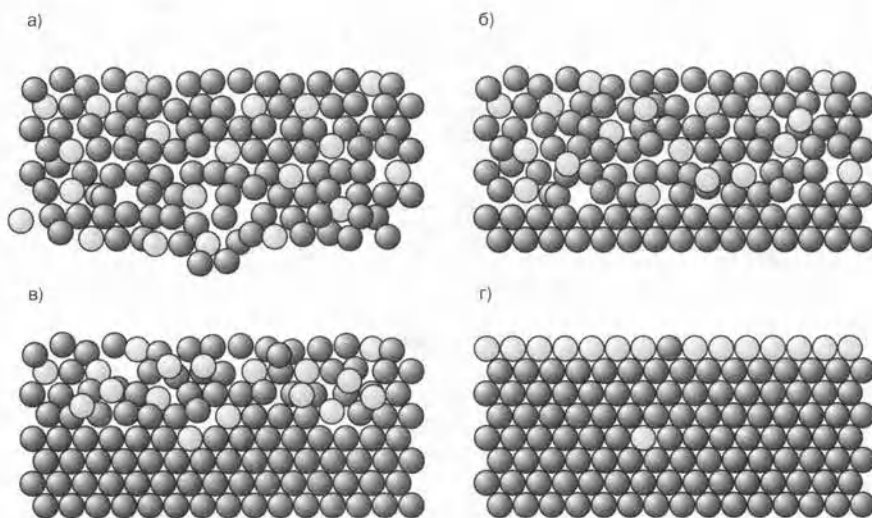
Любая физическая система стремится минимизировать свою потенциальную энергию. Например, мяч скатывается с горки, чтобы минимизировать свою потенциальную энергию гравитации. Аналогичным образом смесь льда и воды минимизирует потенциальную энергию, “выталкивая” примеси из льда в воду при ее замерзании.

Вода в жидкой фазе сама по себе уже является неупорядоченной системой, поэтому растворение в ней других твердых, жидких и газообразных веществ не представляет трудностей. В то же время лед — кристалл с очень высокой степенью порядка, который нарушается в присутствии других растворенных веществ. В отсутствие примесей молекулы воды в кристалле льда упаковываются теснее и, соответственно, понижается суммарная потенциальная энергия. Таким образом, содержащая примеси смесь льда и воды достигает минимальной потенциальной энергии, когда все примеси оказываются в жидкости, а лед состоит только из молекул воды.

Если вода замерзает медленно, образующиеся кристаллы льда будут содержать очень небольшое количество примесей, поэтому в конце концов последние окажутся сконцентрированы в незамерзшей части воды (рис. 8.4.3). При разделении чистой и загрязненной воды происходит уменьшение беспорядка, поэтому, для соблюдения второго закона термодинамики, где-то в другом месте должен быть создан дополнительный беспорядок. Этот дополнительный беспорядок возникает в холодной области, где замерзает соленая вода. Соленая вода не замерзает, пока температура не упадет гораздо ниже обычной температуры замерзания воды. При замерзании соленая вода выделяет тепло в эту очень холодную область и тем самым вносит в нее беспорядок. Добавление тепла к очень холодной системе создает больше беспорядка, чем добавление того же количества тепла к менее холодной системе. Возросшая энтропия холодной области более чем компенсирует уменьшение энтропии замерзающей чистой воды.

Тем не менее беспорядок возникает при любой возможности, поэтому в образовавшихся ледяных кристаллах всегда есть дефекты. Даже если в них нет примесей, то все равно есть какие-то незначительные отклонения, в том числе недостатки упаковки молекул или пустые места в упорядоченной структуре кристалла. Абсолютно идеальные кристаллы чрезвычайно трудно или даже невозможно создать.

**Рис. 8.4.3.** Неупорядоченная структура жидкой фазы воды может включать различные растворенные ионы и молекулы (а). Структура льда слишком упорядочена, чтобы включать примеси. По мере того как вода замерзает снизу вверх (б — г), граница между льдом и водой так же медленно поднимается. Лед захватывает все больше и больше молекул воды (темные шарики), но вытесняет почти все молекулы примесей (светлые шарики). В конце концов молекулы примесей образуют отдельные скопления — твердые, жидкие или газообразные (г).



Когда вы замораживаете ведро соленой воды, то ледяные кристаллы, которые образовались первыми, содержат очень мало соли. Концентрация соли в оставшейся незамерзшей соленой воде повышается по мере того, как все больше молекул воды связывается в лед. К тому моменту, когда остается уже совсем немного воды, концентрация солей в ней так велика, что начинают формироваться соляные кристаллы. Эти кристаллы очень легко могут быть поглощены льдом, поэтому нужно отделить лед от солевого раствора до того, как начнется их формирование. Когда вы замораживаете лед в кубиках, сначала замерзает поверхность, а примеси концентрируются в центре кубика. Одной из основных примесей является растворенный воздух, который в конце концов выходит из раствора и образует крошечные пузырьки воздуха внутри льда — белый туман, который делает лед непрозрачным. Один из способов уменьшить образование тумана — прокипятить воду перед замораживанием. При кипячении растворимость воздуха падает, он удаляется из раствора, поэтому во льду образуется всего несколько пузырьков.

Замораживание соленой воды с целью получения чистого льда наиболее целесообразно в холодных регионах с естественными низкими температурами. Искусственным вымораживанием также можно получить пресную воду из соленой, но это чересчур дорого. Поскольку скрытая теплота плавления воды велика, то, чтобы заморозить воду, нужно отвести от нее очень большое количество тепла. И хотя существуют холодильные опреснительные установки, они менее экономичны, чем перегонка (об еще одном применении замораживания и плавления для очистки веществ см. 5).

## Осмоз

Еще один способ опреснения воды — это осмос, процесс, напоминающий фильтрование, но на молекулярном уровне. В этом случае соленая вода превращается в пресную благодаря отделению примесей с помощью фильтра с чрезвычайно мелкими порами. Но поскольку процесс идет на уровне молекул, при обратном осмосе возникают необычные эффекты, связанные с давлением, нехарактерные для фильтров с большим размером пор. Прежде чем разобраться в этом явлении, давайте поймем, что такое вообще осмос.

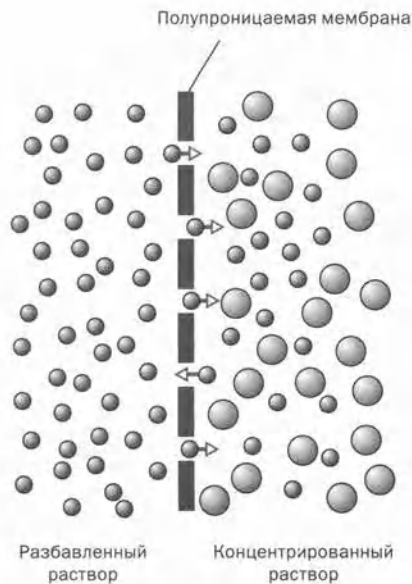
Осмоз возникает, когда две различные жидкости помещают по разные стороны полупроницаемой мембраны. Такая мембрана представляет собой поверхность, через которую могут проходить только определенные частицы. Молекулы жидкости активно колеблются, так как обладают запасом тепловой энергии. Колеблясь, они сталкиваются друг с другом и с мембраной. Те частицы, которые могут пройти через мембрану, часто так и делают. Они перемещаются то туда, то обратно, пока система не достигнет фазового равновесия. В условиях равновесия суммарный поток частиц через мембрану становится равен нулю, и состав обеих жидкостей с течением времени больше не меняется.

Если давление жидкостей по обе стороны мембраны одинаковое, то равновесие устанавливается тогда, когда становятся равными концентрации молекул с низкой подвижностью, не способных пройти через мембрану (под концентрацией мы понимаем количество частиц в единице объема). Что касается подвижных молекул, то они и после наступления равновесия продолжают переходить через мембрану в обоих направлениях.

Если же по одну сторону мембраны (справа на рис. 8.4.4) мы поместим более концентрированный раствор молекул низкой подвижности, в нем будет меньше подвижных молекул, чем в левой части сосуда. В этом случае подвижные молекулы из этой другой части будут стремиться пройти через мембрану в более концентрированный раствор. Поток этих молекул разбавит концентрированный раствор справа. Раствор же слева от мембраны, лишившись части подвижных молекул, станет более концентрированным.

Некоторые полупроницаемые мембраны пропускают молекулы воды, но не пропускают молекулы соли. Соль в растворе существует в виде отдельных заряженных частиц — ионов, окруженных сольватной оболочкой из молекул воды. Хотя сами по себе ионы очень малы, сольватные оболочки увеличивают их в размерах и не дают пройти через мембрану. Таким образом, ионы соли обладают низкой подвижностью, и осмос осуществляется между соленой и пресной водой. Если

3 Зонная плавка — один из лучших способов получения сверхчистых материалов. В этой технологии стержень из материала с примесями медленно проводится через нагреватель, и таким образом расплавленная зона перемещается вдоль стержня. Если примесь лучше растворима в жидкой фазе, то она будет накапливаться в расплавленной зоне, перемещаясь вместе с ней вдоль стержня. В результате получается вещество очень высокой чистоты, которое может содержать всего один атом примесей на миллиард.



**Рис. 8.4.4.** Осмос возникает, когда по обе стороны полупроницаемой мембраны находятся две разные жидкости. Только маленькие подвижные молекулы могут проходить через поры мембраны. Как правило, эти молекулы устремляются в область, где наиболее высокое содержание молекул с низкой подвижностью. На рисунке более концентрированный раствор находится справа, поэтому суммарный поток подвижных молекул направлен вправо.

поместить по обе стороны полупроницаемой мембраны соленую и пресную воду, молекулы воды будут переходить из отсека с пресной водой в соленую, разбавляя последнюю. В результате масса раствора в отсеке с пресной водой будет уменьшаться. Молекулы воды будут продолжать переходить через мембрану в отсек с соленой водой, пока концентрации соли по обе стороны мембраны не сравняются.

Единственный способ остановить осмос и прекратить разбавление соленой воды — повысить ее давление. Повышение давления приведет к тому, что молекулы воды будут выдавливаются через мембрану обратно в пресную воду. Оба раствора вновь достигнут фазового равновесия, но концентрация частиц с низкой подвижностью в соленой воде будет выше, чем в пресной. Поддержание высокой разности концентраций по обе стороны мембраны требует давления в десятки, а то и в сотни атмосфер.

Осмос имеет место в подавляющем большинстве биологических систем, потому что биологические мембраны чаще всего полупроницаемы. Подвижные молекулы (как правило, вода) проходят через эти мембраны, стремясь уравнять концентрации молекул с низкой подвижностью в двух растворах. Например, кожа человека в случае контакта с концентрированным соевым раствором теряет влагу. Молекулы воды покидают кожу, стремясь разбавить раствор. В то же время в случае контакта с пресной водой кожа, наоборот, будет поглощать влагу. В клетках кожи содержатся молекулы с низкой подвижностью, и молекулы воды стремятся проникнуть внутрь, чтобы разбавить содержимое клетки.

Такого рода водообмен особенно важен для животных, обитающих в пресной или соленой воде, в частности для микроорганизмов. Микроорганизмы должны контролировать осмос, иначе последствия для них будут очень тяжелыми. Один из способов контроля — поддержание внутри клеток примерно таких же концентраций молекул с низкой подвижностью, как в окружающей их среде. Для этого микроорганизмы должны адаптироваться либо к пресной, либо к соленой воде. В соленой воде пресноводные микроорганизмы будут терять воду, в то время как организмы, обитающие в соленой воде, попав в пресную, могут разбухнуть и даже лопнуть.

Растения используют осмос для всасывания воды корневыми волосками. В корневых волосках содержится относительно концентрированный раствор малоподвижных соединений, и почвенная вода проникает в них, чтобы разбавить эти растворы. Собственно говоря, вода проникает в корневую систему с таким напором, что давление внутри корневых волосков становится во много раз выше атмосферного. Отчасти благодаря столь высокому осмотическому давлению вода поднимается до самых верхушек деревьев.

## Обратный осмос

Как уже отмечалось, можно использовать давление, чтобы остановить переход молекул воды в более концентрированный раствор. В процессе осмоса концентрации молекул с низкой подвижностью выравниваются, только если давление по обе стороны полупроницаемой мембраны одинаковое. Если к солевому раствору приложить некоторое давление, он останется более концентрированным, чем раствор по другую сторону мембраны. Если же давление в отсеке с соевым раствором станет достаточно высоким, то оно может заставить процесс осмоса пойти в обратную сторону. Молекулы воды начнут переходить из солевого раствора в пресную воду!

Этот процесс — обратный осмос — можно использовать для извлечения пресной воды из соленой, но он требует высоких давлений. Обычная обратно-осмотическая ячейка работает при давлении примерно в 1000 раз выше атмосферного. Полупроницаемая мембрана должна быть в состоянии выдержать такую колоссальную разницу давлений — высокого со стороны солевого раствора и низкого со стороны пресной воды. Кроме того, осмос — довольно медленный процесс, поэтому в обратноосмотических установках приходится использовать мембраны с огромной площадью поверхности.

Чтобы получить такую поверхность, листы нескольких различных материалов складывают вместе и затем скатывают в рулон. Получается длинный многослойный цилиндр. Через один слой подается соленая вода, другой представляет собой полупроницаемую мембрану, через третий выводится чистая вода. Рулон

устроен таким образом, что мембрана не лопается, даже когда соленая вода подается на нее под высоким давлением.

В этот скрученный многослойный бутерброд заходит соленая вода, а выходит пресная. Впрочем, соленая вода тоже выходит из аппарата по отдельной трубе. Если опреснительная установка пытается "выдавить" слишком много пресной воды из соленой, последняя становится чересчур концентрированной, а повышение концентрации затрудняет процесс осмоса. Чтобы избежать этого, из каждой порции соленой воды извлекается в виде пресной лишь малая часть. Соленая вода с незначительно повысившейся концентрацией возвращается в океан, а в аппарат закачивается следующая порция соленой воды.

Обратный осмос энергетически вполне эффективен, потому что не связан с фазовыми переходами, так что не нужно подводить или отводить никакой скрытой теплоты. Энергия расходуется только на подачу соленой воды в систему под очень высоким давлением. Правда, эта энергия довольно велика и поступает в виде механической работы.

## Фильтры для очистки питьевой воды

---

Что бы ни утверждала реклама, ни один фильтр не способен произвести химически чистую воду. И это на самом деле очень хорошо, потому что химически чистая вода не так уж хороша на вкус и не так уж полезна. Вместо этого активированный уголь и ионообменные смолы в бытовых фильтрах избирательно удаляют из воды нежелательные ионы и молекулы, оставляя многие другие компоненты, которые и придают воде свежий вкус.

Кроме того, подобная избирательность продлевает срок службы фильтра. Его емкость, то есть способность поглощать химические соединения из воды, ограничена вторым законом термодинамики: чем более чистой и упорядоченной становится вода, тем более грязным и беспорядочным будет фильтр. В конечном счете энтропия в этом процессе не может уменьшиться и даже увеличивается. Накапливающийся в фильтре беспорядок постепенно снижает его эффективность, и рано или поздно фильтр приходится менять. Тот факт, что безобидные и желательные вещества остаются в отфильтрованной воде, позволяет фильтру медленнее накапливать беспорядок и пропускать через себя больше воды до замены.

Один из ключевых компонентов питьевого фильтра — активированный уголь, высокопористая форма угля, способная, словно губка, впитывать определенные типы нежелательных молекул. Эти молекулы примесей застревают в ловушке — обширном лабиринте микроскопических пор угля. В одном грамме активированного угля помещается более 1000 м<sup>2</sup> поверхности — площадь, по размеру сопоставимая с футбольным полем. Благодаря разветвленной пористой структуре активированный уголь может поглотить феноменальное количество молекул примесей, прежде чем фильтр окончательно загрязнится и выйдет из строя.

Активированный уголь особенно эффективно извлекает из воды гидрофобные органические молекулы — маслянистые частицы, которые плохо связываются с водой. Зато они при первой же возможности плотно прилипают к углю. Активированный уголь также очищает воду от многих веществ, придающих ей неприятный вкус и запах. Однако, вероятно, важнее всего, что активированный уголь поглощает агрессивный "свободный хлор" — молекулы хлора (Cl<sub>2</sub>) и хлорноватистой кислоты (HOCl), которые добавляются в водопроводную воду в целях обеззараживания. Уголь превращает эти молекулы в безвредные хлорид-ионы (Cl<sup>-</sup>) и ионы водорода (H<sup>+</sup>).

Ионообменные смолы, которые используются в фильтрах для очистки питьевой воды, представляют собой высокотехнологичные полимеры, которые обладают способностью замещать менее растворимые ионы токсичных металлов, такие как свинец (Pb<sup>2+</sup>), медь (Cu<sup>2+</sup>), ртуть (Hg<sup>2+</sup>), кадмий (Cd<sup>2+</sup>), имеющиеся в воде, на растворимые ионы водорода (H<sup>+</sup>). Эти смолы также удаляют из жесткой воды достаточное количество ионов кальция (Ca<sup>2+</sup>) и магния (Mg<sup>2+</sup>), чтобы предотвратить образование накипи в чайниках и чашках. Ионы кальция и магния, однако, имеют важное значение для вкуса воды, поэтому лучшие фильтры не удаляют их полностью. Это как раз те примеси, которые желательно оставить в питьевой воде.

---



## ГЛАВА 9

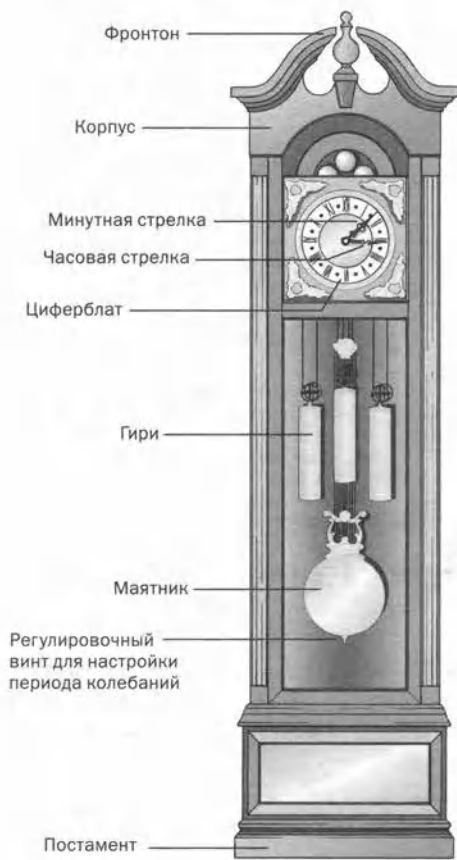
# КОЛЕБАНИЯ И МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ

**М**ногие завораживающие движения вокруг нас повторяются снова и снова. Наша жизнь паполнена повторяющимися циклами: от ежедневного движения Солнца по небосводу до волнистой ряби на поверхности пруда в дождливый день. Эти циклы, управляемые законами физики, неуклонно сопровождают наше путешествие сквозь пространство и время. Некоторые из этих циклов организуют нашу жизнь в силу необходимости или традиции, в то время как другими можно просто любоваться. Но существуют еще и такие, которые стали частью нашей повседневности просто потому, что они полезны или доставляют нам удовольствие. В этой главе мы обсудим все три варианта, исследуя циклическое движение в трех проявлениях: в часах, музыкальных инструментах и на морском берегу.

Чтобы хорошо понимать науку, нужно уметь обобщать. Природа не изобретает новые физические механизмы для каждой новой ситуации, и человек, который хочет мыслить научно, не должен открывать Америку всякий раз, когда сталкивается с новым проявлением знакомых физических законов. Подход “если видел одного, значит, видел всех” можно применить ко многим научным проблемам.

Несмотря на очевидные различия между явлениями, о которых я буду говорить в этой главе, в их основе лежат одни и те же физические принципы. Это глубинное концептуальное сходство приводит нас, физиков, в такой восторг, что мы начинаем перескакивать с одного примера на другой, совершенно запутывая читателей и зрителей. С другой стороны, тот, кто упорно не хочет замечать связь явлений, основанную на общих физических закономерностях, рискует за деревьями не увидеть леса. Надеюсь, что мне удастся провести вас через этот сказочный лес колебаний и механических волн, чтобы вы поняли, как устроено каждое дерево, но при этом смогли оценить и лес в целом.

- 312 **9.1 Часы**  
*Как часы используют ритмическое движение для измерения времени.*
- 321 **9.2 Музыкальные инструменты**  
*Как инструменты держат строй и издают звуки.*
- 333 **9.3 Море**  
*Как устроено море и как оно несет волны.*



## 9.1 Часы

Мы измеряем нашу жизнь по небесным телам, делим ее на дни, месяцы и годы в соответствии с движением Солнца, Луны и звезд. Но в менее романтическом масштабе повседневной жизни от небесной механики не так уж много проку. Поэтому для измерения небольших периодов времени люди придумали часы.

Действие первых часов было основано на отрезках времени, необходимых для завершения коротких процессов — перетекания песка или воды, сгорания свечи. Но эти измерения были неточными и к тому же требовали постоянного присмотра. Более совершенные часы измеряют время с помощью периодически повторяющихся движений — качаний или колебаний. В этом разделе мы рассмотрим, как работают современные часы, в основе действия которых лежит повторяющееся движение. Но при этом нам предстоит убедиться, что повторяющиеся движения интересны сами по себе и что в природе они встречаются в бесчисленном множестве объектов, а вовсе не только в часах.

### Время

Перед тем как заняться часами, стоит уделить время... самому времени. Ученые рассматривают время как одно из измерений — похожее на три пространственных измерения, с помощью которых мы воспринимаем окружающий мир, но не идентичное им. Всего наша Вселенная имеет четыре измерения: три пространственных и одно временное. Таким образом, чтобы точно описать, когда и где происходит событие, требуется четыре величины: три цифры определяют пространственные координаты, то есть местоположение события, и одна указывает на конкретный момент времени.

Очевидная разница между пространством и временем состоит в том, что мы можем видеть окружающее нас пространство, но при этом можем наблюдать лишь прохождение времени. В данный конкретный момент мы занимаем лишь



одно определенное положение во Вселенной, но тем не менее мы каким-то образом ощущаем окружающее нас пространство. Гораздо труднее представить себе всю шкалу времени, простирающуюся и в прошлое, и в будущее; для этого нужно недюжинное воображение.

Наше восприятие пространства в конечном счете основано на потребности в силе, ускорении и скорости, необходимых для того, чтобы перемещаться из одного места в другое. Мы считаем, что некий город находится далеко, потому что знаем, что путешествие туда с соответствующими затратами сил, ускорения и скорости займет много времени. Наше восприятие времени основывается на тех же механических принципах. Если два момента времени разделены длительным промежутком, то мы считаем, что при разумной затрате сил, ускорения и скорости мы сможем за этот промежуток времени переместиться на большое расстояние. Короче говоря, наши представления о пространстве и времени взаимосвязаны — так же как и системы измерения времени и пространства.

Мы измеряем расстояние линейкой, а время — часами. Но как изготовить линейку? Можно, например, создать огромную линейку, если ехать в машине с постоянной скоростью и с интервалом в одну секунду делать краской отметки на асфальте. От такой линейки будет мало практической пользы, но она соответствует определению линейки: на ней на равных расстояниях нанесены пространственные отметки. Вы использовали перемещение во времени для измерения пространства.

А как изготовить часы? Можно получить весьма необычные часы, если ехать с постоянной скоростью вдоль нашей гигантской линейки и делать отсчет на каждой очередной отметке. В этом случае вы использовали перемещение в пространстве для измерения времени. В большинстве часов и в самом деле для измерения времени используется движение. Но, как мы сейчас увидим, перемещения в этом случае бывают не такие масштабные, как поездка в автомобиле.

## Собственные колебания

Движение, которое можно было бы использовать для измерения времени, в идеале должно быть и точным, и удобным для пользователя. Это исключает некоторые очевидные варианты. Солнце, Луна и звезды очень точны, но не слишком удобны. Да, законы сохранения энергии, момента и углового момента полностью контролируют движение светил, и эти небесные тела веками двигаются стабильно и предсказуемо. Но что нам делать в пасмурный день? Конечно, простые устройства для отмеривания равных промежутков времени, вроде песочных часов или горящих свечей, легко изготовить и использовать, но их точность оставляет желать лучшего. Кроме того, кто будет “стоять на часах” всю ночь, зажигая новые свечи, лишь бы эти “часы” не остановились? (Еще об интересных астрономических часах см. 1.)

В отличие от этих устройств, действие обычных часов основано на определенной разновидности повторяющихся движений, которая называется собственным резонансом или свободными колебаниями. Явление собственного (естественного) резонанса состоит в том, что энергия изолированного тела (или системы тел) заставляет его снова и снова выполнять определенные движения. Собственные колебания демонстрируют многие окружающие нас предметы, от кресел-качалок до плещущейся в тазике воды или раскачивающегося на ветру флажштока. Во всех этих случаях обычно происходит движение относительно какого-то положения устойчивого равновесия. Как и в случае с пружинными весами в разделе 3.1, тело, выведенное из состояния равновесия, стремится возвратиться в это состояние, но “промахивается” — проскакивает точку равновесия и должно повернуть обратно, чтобы попробовать еще раз. Пока тело обладает избыточной энергией, оно будет колебаться взад-вперед относительно точки равновесия — это и есть собственный резонанс.

Некоторые виды свободных колебаний, например прыжки отскакивающего от пола мяча или покачивающейся бутылки, не поддерживают постоянный ритм и поэтому не годятся для часов. Но сейчас мы рассмотрим группу чрезвычайно размеренных периодических движений, которые могут быть использованы для измерения времени с поразительной точностью. Эти колебания принадлежат к важному классу механических систем, известных как гармонические осцилляторы.

1 Британский астроном Джоселин Белл Бернелл (р. 1943) очень рано заинтересовалась радиоастрономией (ее отец-архитектор построил планетарий в Северной Ирландии). Ей посоветовали вначале овладеть физикой, и скоро она уже училась в университете Глазго — единственная девушка из 50 студентов курса. Работая над докторской диссертацией в Кембридже, Белл обнаружила внеземной источник радиовсплесков, происходящих с интервалом ровно в 1,33730113 секунды. Так был открыт первый пульсар — сколлапсировавшая звезда, угловой момент которой заставляет ее вращаться с удивительно равномерной скоростью. Каждый всплеск совпадает с одним оборотом бывшей звезды.

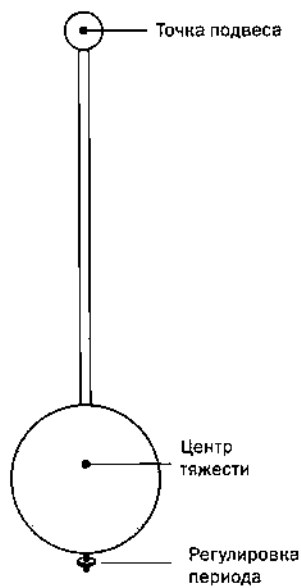


Рис. 9.1.1. Маятник представляет собой гирию, свисающую с точки подвеса. Маятник находится в состоянии равновесия, когда его центр тяжести расположен прямо под точкой подвеса.

\* Это отношение возвращающей силы, измеряемой в ньютонах к отклонению, взятому в метрах. Термин "жесткость" более уместен в случае с пружиной, для маятника лучше говорить о коэффициенте возвращающей силы.

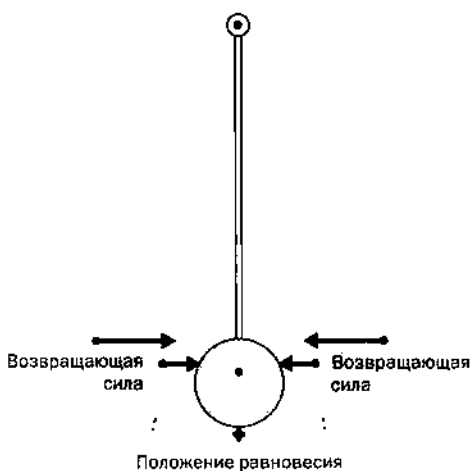


Рис. 9.1.2. Если отклонить маятник от положения равновесия, на него будет действовать возвращающая сила, пропорциональная расстоянию до положения равновесия.

Один из первых видов собственного резонанса, который нашел применение в часах, — это качание маятника, то есть гири, подвешенной к определенной точке (рис. 9.1.1). Когда центр тяжести маятника расположен непосредственно под точкой подвеса, маятник пребывает в состоянии равновесия. Его центр тяжести при этом находится в самом нижнем из возможных в данном случае положений, так что смещение маятника повышает его гравитационную потенциальную энергию и возвращающая сила начинает толкать его обратно в положение равновесия (рис. 9.1.2). По геометрическим причинам эта возвращающая сила почти в точности пропорциональна расстоянию, на которое маятник отклонился от положения равновесия. Чем дальше вы отклоните маятник, тем больше будет возвращающая сила.

Как только вы отпустите отклоненный маятник, возвращающая сила заставит его двигаться обратно к положению равновесия. Но вместо того чтобы остановиться в этом положении, маятник начнет качаться взад и вперед относительно него. Эти повторяющиеся движения называют колебаниями. Когда маятник качается, его энергия переходит то в потенциальную, то в кинетическую форму. Когда маятник быстро проскакивает через положение равновесия в середине колебания, вся его энергия — кинетическая. Когда он на мгновение останавливается в крайнем положении, вся его энергия — гравитационная потенциальная. Эти повторяющиеся преобразования избыточной энергии из одной формы в другую являются частью любого колебания и заставляют осциллятор — систему, которая испытывает колебания, — двигаться туда и обратно, пока избыточная энергия не преобразуется в тепловую или не будет куда-то передана.

Но маятник — это не просто осциллятор. Поскольку его возвращающая сила пропорциональна смещению от положения равновесия, маятник является гармоническим осциллятором — самой простой и понятной из существующих в природе механических систем. Будучи гармоническим осциллятором, маятник совершает простые гармонические колебания, размеренные и предсказуемые, что делает его непревзойденным измерителем времени.

Период колебания любого гармонического осциллятора — время, которое требуется, чтобы завершить один полный цикл движения, — зависит только от того, насколько жестко возвращающая сила толкает маятник вперед и назад, и от того, насколько упорно его масса сопротивляется этому возвратно-поступательному движению. Жесткость (точнее, коэффициент жесткости) является мерой того, насколько быстро растет возвращающая сила по мере того, как осциллятор выводится из равновесия; высокий коэффициент жесткости (чаще его называют коэффициентом упругости\*) и, соответственно, большая возвращающая сила свойственны твердым телам, в то время как небольшие коэффициенты жесткости и слабая возвращающая сила ассоциируются с мягкими телами. Чем выше коэффициент жесткости, тем больше возвращающая сила, которая толкает маятник обратно, и тем меньше период колебаний осциллятора. С другой стороны, чем больше масса осциллятора, тем меньше он ускоряется и тем больше период колебаний.

Однако самое замечательное и важное свойство гармонического осциллятора состоит не в том, что период колебаний зависит от жесткости и массы, а в том, что он не зависит от амплитуды — то есть величины его максимального смещения от положения равновесия. Маленькая амплитуда или большая — период колебаний гармонического осциллятора остается постоянным. Такая нечувствительность к амплитуде — следствие того, что возвращающая сила пропорциональна расстоянию от точки равновесия. При больших амплитудах осциллятор в каждом цикле отклоняется на большее расстояние, но и возвращающая сила, действующая на него в этом цикле, тоже больше. В результате гармонический осциллятор совершает циклы движения с большой амплитудой абсолютно за то же время, что и циклы с маленькой амплитудой.

Любой гармонический осциллятор можно представить как результат противодействия двух составляющих: возвращающей, которая вызывает движение, и инерционной, которая сопротивляется движению. Их соотношение определяет величину периода колебаний осциллятора. Гармонический осциллятор с высокой жесткостью, большой возвращающей силой и маленькой инерцией имеет ко-

роткий период колебаний, в то время как более мягкий осциллятор с большой инерцией имеет длинный период. А вот амплитуды колебаний совершенно не влияют на период, и именно поэтому гармонический осциллятор — идеальное устройство для отсчета времени. Поскольку обычные часы не могут полностью контролировать амплитуду своих колебаний, практически все они основаны на гармонических осцилляторах.

### Гармонические осцилляторы

В гармонических осцилляторах возвращающая сила пропорциональна смещению от положения равновесия. Период колебаний зависит только от жесткости и массы осциллятора, а не от амплитуды колебаний.

Собственно говоря, маятник представляет собой не совсем обычный гармонический осциллятор, поскольку его период колебаний не зависит от массы. Это обусловлено тем, что при увеличении массы маятника также растет его вес и соответственно растет возвращающая сила. Два эти изменения точно уравнивают друг друга, поэтому период колебаний маятника не меняется.

Однако этот период колебаний зависит от длины маятника и от гравитации. Если вы укоротите маятник, расстояние между точкой подвеса и его центром тяжести уменьшится, возвращающая сила увеличится, период колебаний станет короче. Если вы усилите гравитацию (например, перебравшись на Юпитер), то увеличите вес маятника, возвращающая сила опять-таки увеличится, период колебаний уменьшится. Мы не будем приводить здесь математическое доказательство, но период колебаний можно рассчитать по формуле:

$$\text{период колебаний} = 2\pi \times \sqrt{\frac{\text{длина маятника}}{\text{ускорение свободного падения}}}$$

Таким образом, короткий маятник качается с большей частотой, чем длинный, и любой маятник качается с большей частотой на Земле, чем на Луне.

На поверхности земли маятник длиной 0,248 м (10 дюймов) имеет период колебаний 1 секунда, что очень подходит для настенных часов, которые передвигают секундную стрелку на одно деление каждый раз, когда маятник совершит полный цикл. Так как период колебаний пропорционален квадратному корню из длины, маятнику длиной 0,992 м (40 дюймов) потребуется две секунды на совершение полного цикла, и в часах с ценой деления 2 секунды стрелка будет каждые две секунды передвигаться на одно деление (**рис. 9.1.3**).

Поскольку период колебаний маятника зависит от его длины и гравитации, изменение любого из этих параметров может привести к сбою. Как мы знаем из главы 7, с повышением температуры тела расширяются, поэтому обычный маятник, если его нагреть, начнет двигаться медленнее. Более точный маятник с термокомпенсацией изготавливают из нескольких различных материалов с разными коэффициентами объемного расширения, чтобы расстояние между центром тяжести и точкой подвеса не менялось.

Сила тяжести не изменяется во времени, но может слегка варьироваться в зависимости от места. Для корректировки разницы в гравитации на маятнике предусмотрена резьбовая ручка регулировки. Она позволяет изменять длину маятника для тонкой настройки периода колебаний.

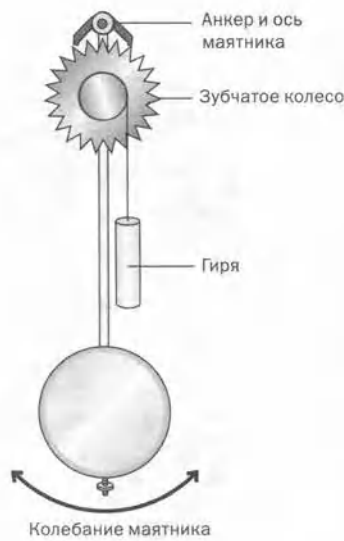
## Маятниковые часы

Да, маятник может поддерживать постоянный ритм, но маятник — это еще не часы. Нужен механизм, поддерживающий непрерывное качание маятника и использующий эти колебания для определения времени. Маятниковые часы решают обе эти задачи. Они поддерживают движение маятника легкими толчками и используют это движение для передвигания стрелок с постоянной скоростью.

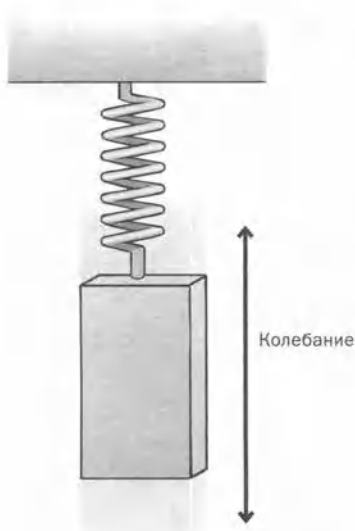
В верхней части маятника находится двузубая вилка — анкер, который управляет вращением зубчатого колеса (**рис. 9.1.4**). Этот механизм называется спуском. Цепочка, на которой подвешена гирия, намотана на вал зубчатого колеса. Она передает на колесо крутящий момент, так что колесо вращалось бы свободно, если бы не зацеплялось зубцами за скобы анкера. Каждый раз, когда маятник максималь-



**Рис. 9.1.3.** Ход этих старинных часов управляется движением маятника. Длина маятника 0,992 м от точки подвеса до центра тяжести. Каждый цикл совершается за 2 секунды, и стрелка передвигается тоже на 2 секунды.



**Рис. 9.1.4.** В маятниковых часах качание маятника определяет, с какой скоростью повернется зубчатое колесо, которое с помощью серии колес контролирует стрелки часов. Анкер позволяет зубчатому колесу повернуться на один зуб каждый раз, когда маятник совершает полный цикл. Гиря создает крутящий момент, который вызывает поворот зубчатого колеса, когда анкер его выпускает. Кроме того, гиря обеспечивает энергию, которая заставляет маятник качаться, несмотря на замедляющее влияние трения и сопротивления воздуха.



**Рис. 9.1.5.** Брусок, подвешенный на пружине, представляет собой гармонический осциллятор. Период колебаний осциллятора определяется только упругостью пружины и массой бруска.

но отклоняется в ту или другую сторону, одна скоба анкера освобождает зубчатое колесо, но другая тут же снова зацепляет его. Колесо проворачивается на один зубец. По мере того как маятник качается вправо и влево, оно проворачивается на один зубец на каждый полный цикл движения маятника.

При этом колесо приводит в движение целую серию шестеренок, которые медленно поворачивают стрелки часов. Стрелки фактически отсчитывают число колебаний маятника с момента запуска, но благодаря регулировке и калибровке циферблата они показывают текущее время. Кроме того, зубчатое колесо поддерживает качание маятника: каждый раз, когда маятник достигает крайней точки, анкер получает от колеса маленький толчок. Поскольку при этом анкер движется в направлении толчка, колесо совершает работу над анкером и маятником, компенсируя им потери энергии на трение и сопротивление воздуха. Источником энергии служит подвешенная на цепочке гиря, которая передает порцию гравитационной потенциальной энергии каждый раз, как гиря опускается. Когда вы заводите часы, вы наматываете цепочку на вал, поднимаете гирю и таким образом пополняете ее запас потенциальной энергии.

Хотя такие толчки от зубчатого колеса могут поддерживать колебания любого, даже самого неуклюжего маятника, часы работают тем лучше, чем свободнее качается маятник. Объясняется это тем, что любая внешняя сила, в том числе толчок от зубчатого колеса, будет влиять на период колебаний маятника. Наиболее точные хронометры могут совершать без какой-либо настройки или поступления энергии тысячи и миллионы циклов колебаний. Этим точнейшим устройствам для поддержания хода нужны только очень легкие толчки, поэтому у них чрезвычайно точные периоды колебаний. Вот почему в хороших маятниковых часах используют аэродинамические маятники и подшипники с низким коэффициентом трения.

Наконец, часы должны поддерживать относительно постоянную амплитуду колебаний маятника. С практической точки зрения резкие изменения амплитуды приведут к неравномерному вращению зубчатого колеса. Но есть и более глубокая причина для того, чтобы следить за постоянством амплитуды: дело в том, что маятник — это не совсем идеальный гармонический осциллятор. Если маятник слишком сильно отклонится, он превратится в негармонический осциллятор, то есть возвращающая сила перестанет быть пропорциональной смещению относительно точки равновесия, и период колебаний будет зависеть от амплитуды. Поскольку изменение периода отразится на точности часов, амплитуда маятника должна быть небольшой и постоянной. В этом случае амплитуда не будет иметь почти никакого влияния на период колебаний маятника.

## Балансовые часы

Возвращающая сила маятника зависит от силы тяжести, поэтому часы с маятником нельзя наклонять или постоянно перемещать. Вот почему маятниковых наручных часов практически не бывает. И чтобы воспользоваться замечательной способностью гармонического осциллятора измерять время, портативным часам необходима какая-нибудь другая возвращающая сила, которая была бы пропорциональна смещению, но не зависела от силы тяжести. Им нужна пружина!

Как мы узнали в разделе 3.1, сила упругости пружины пропорциональна ее сжатию. Чем сильнее вы растягиваете, сжимаете или изгибаете пружину, тем с большей силой ее отбрасывает назад в равновесное состояние. Прикрепите к свободному концу пружины деревянный брусок, аккуратно оттяните его и отпустите, как показано на **рис. 9.1.5**, — и вы получите гармонический осциллятор, период колебаний которого будет определяться только упругостью пружины и массой бруска. Так как период колебаний гармонического осциллятора не зависит от амплитуды движения, брусок равномерно колеблется относительно положения равновесия и может служить для отсчета времени.

К сожалению, эту простую систему усложняет гравитация. Хотя сила тяжести и не меняет период колебаний, она смещает положение равновесия бруска вниз. Это смещение — серьезная проблема для часов: вдруг их придется наклонить? Тем не менее существует еще одно основанное на пружине устройство, ко-

торое очень точно отсчитывает время независимо от ориентации и положения. Это замечательное устройство используется в большинстве наручных и портативных механических часов и называется балансировочным кольцом или просто балансиrom (балансом).

Балансировочное кольцо напоминает миниатюрное металлическое велосипедное колесо, которое в центре тяжести поддерживается осью и парой опор (рис. 9.1.6). Опоры расположены настолько близко к оси, что трение в них создает лишь очень незначительный крутящий момент, поэтому колесико вращается очень свободно. Более того, поскольку колесико баланса вращается относительно собственного центра тяжести, его вес не передает на колесо никакого крутящего момента.

Крутящий момент на балансиr передает лишь крохотная спиральная пружина. Внутренний конец спирали крепится на оси балансира, а внешний прикреплен к каркасу часов. Когда спираль не натянута, она не передает крутящий момент балансиру, и балансировочное кольцо находится в равновесии. Но если повернуть кольцо в любом направлении, крутящий момент от натянутой спирали будет направлен на то, чтобы вернуть кольцо в состояние равновесия. Так как величина этого момента пропорциональна отклонению кольца от положения равновесия, баланс и спираль образуют гармонический осциллятор!

Поскольку данный гармонический осциллятор основан на вращении, период его колебаний зависит от торсионной жесткости, или жесткости при кручении спиральной пружины, — то есть от того, насколько быстро растет крутящий момент при натяжении спирали, а также от массы вращения балансировочного колеса, то есть его момента инерции. Так как период колебаний баланса не зависит от их амплитуды, баланс может очень точно отсчитывать время. А поскольку сила тяжести не передает кольцу крутящий момент, этот измеритель времени будет работать в любом месте и в любом положении.

В остальном балансовые часы очень похожи на маятниковые (рис 9.1.7). Поворачиваясь то в одну, то в другую сторону, баланс ударяет по рычажку, который управляет движением зубчатого колеса. За одно полное колебание баланса анкер, присоединенный к рычажку, разрешает зубчатому колесу повернуться на один зуб. Другие зубчатые колеса соединяют анкерное колесо с часовыми стрелками, которые медленно поворачиваются по мере вращения колеса.

Поскольку смысл балансовых часов в том, чтобы они были переносными, такие часы не могут черпать энергию от подвешенной гири. Вместо этого в них имеется заводная пружина, которая передает крутящий момент зубчатому колесу. Пружина представляет собой спираль из упругого металла, которая запасает энергию, когда вы заводите часы. Энергия пружины заставляет балансировочное кольцо равномерно поворачиваться вперед и назад, а также двигает часовые стрелки. Так как заводная пружина, по мере того как поворачивается зубчатое колесо, постепенно раскручивается, часы периодически нужно заводить (о необычных балансовых часах см. 2).

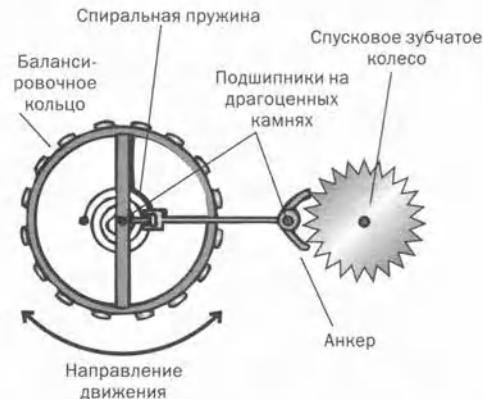


Рис. 9.1.6. Часы с балансиrom используют вращающееся кольцо для поворота зубчатых колес, которые управляют движением часовых стрелок. Анкер позволяет зубчатому колесу передвинуться на один зуб каждый раз, когда кольцо совершает полный цикл. Энергия поступает от основной пружины (не показана), которая передает постоянный крутящий момент зубчатому колесу.

2 Отец и дед Бенджамин Баннекер (афроамериканского математика, астронома и писателя, 1731–1806) были рабами, позднее получившими свободу. Бенджамин вырос на табачной ферме в штате Мэриленд. Он с детства увлекался естественными науками и математикой, компенсируя недостаток школьного образования прилежным чтением. Больше всего Баннекер известен своими работами в области астрономии и составлением шести астрономических альманахов, но он также сконструировал одни из первых часов, полностью созданных в Америке. Имея в качестве образца только позаимствованные у кого-то карманные часы, Баннекер вырезал ножом из дерева часы с балансиrom, которые точно шли в течение полувека и даже отбивали время.

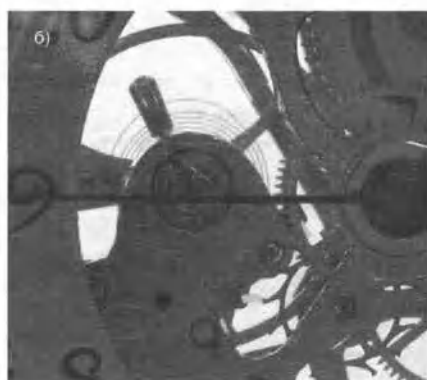


Рис. 9.1.7. (а) Балансировочное кольцо в современных прозрачных часах ритмично вращается взад-вперед под действием спиральной пружины; (б) для снижения трения и износа на анкере установлены крошечные драгоценные камни. (в) Старинные французские дорожные часы: баланс поддерживается крошечными рубиновыми опорами (в центре), которые помогают минимизировать трение и поддерживать очень точный ход.

Минимальная погрешность хода маятниковых и балансовых часов, возникающая из-за трения, сопротивления воздуха и теплового расширения материалов, составляет около тридцати секунд в сутки. Чтобы повысить точность хода, нужно избавиться от этих механических недостатков. Вот почему во многих современных часах для отсчета времени используются кварцевые осцилляторы.

Кварцевый осциллятор изготавливают из монокристалла кварца, того самого минерала, из которого в основном состоит обычный белый песок. Как и многие твердые и хрупкие тела, кристалл кварца после удара по нему сильно вибрирует. На самом деле он работает как гармонический осциллятор, как пружина с бруском на обоих концах (рис. 9.1.8, а, б). Два бруска симметрично колеблются относительно их общего центра масс с периодом, который определяется только массой брусков и упругостью пружины. В кристалле кварца пружиной является сам кристалл, а брусками можно считать две его половины (рис. 9.1.8, в, г). Так как силы, действующие на бруски, пропорциональны их смещению от положения равновесия, система представляет собой гармонический осциллятор.

Благодаря исключительной твердости минерала, возвращающая сила, действующая в кристалле кварца, очень велика. Даже маленькое возмущение вызывает огромную возвращающую силу. Так как период колебаний гармонического осциллятора тем меньше, чем больше жесткость пружины, типичный кварцевый осциллятор имеет очень короткий период. Его движение чаще называют вибрацией, а не колебанием, так как вибрация подразумевает быстрое колебание в механической системе. Термин же «колебания» является более общим, он описывает любые повторяющиеся процессы и может применяться к таким явлениям, как немеханические электрические или тепловые колебания.

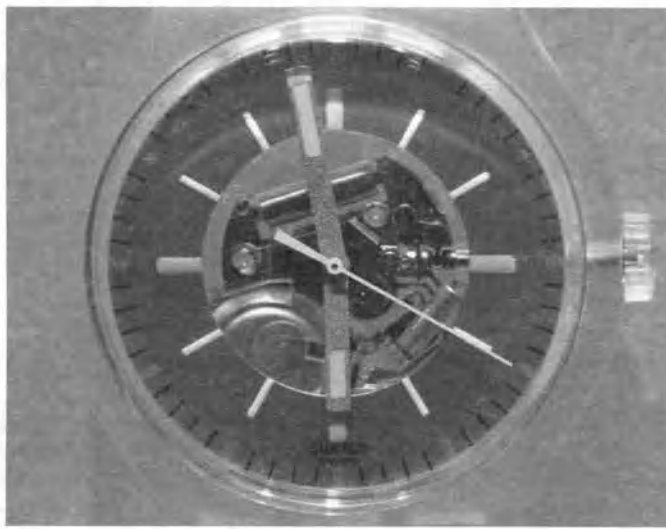
Вследствие столь быстрой вибрации период колебаний кварцевого генератора составляет малую долю секунды. В качестве основной характеристики таких быстрых осцилляторов обычно применяют частоту — количество циклов колебания в определенный промежуток времени. В системе СИ единица частоты, равная одному циклу в секунду, называется герц (сокращенно Гц) в честь немецкого физика Генриха Рудольфа Герца. Период и частота обратно пропорциональны друг другу (период равен единице, деленной на частоту, и наоборот), так что осциллятор с периодом колебаний 0,001 с имеет частоту 1000 Гц.

Поскольку вибрирующий кристалл ни обо что не трется и не перемещается в воздухе, он медленно теряет энергию и может колебаться очень и очень долго. А поскольку коэффициент теплового расширения кварца ничтожно мал, период его колебаний практически не зависит от температуры. Имея столь устойчивый период, кварц обеспечивает очень точный ход. Кварцевые часы за год «убегают» или опаздывают всего лишь на одну десятую секунды.

Конечно, кристалл кварца — это еще не часы. Как и в случаях с маятником или балансиrom, какой-то механизм должен поддерживать вибрацию и использовать ее для определения времени. Хотя эти задачи может решать механика, в кварцевых часах обычно применяется электроника. Для этого есть две причины. Во-первых, вибрации кристалла слишком быстры и незначительны по амплитуде, чтобы механические устройства успевали на них реагировать. Во-вторых, кристалл кварца по своей природе уже является электронным прибором, он ме-

**Рис. 9.1.8.** Кристалл кварца действует как пружина с грузами на каждом конце. Так же как две массы попеременно то сближаются (а), то отдаляются (б), так и две половинки вибрирующего кристалла то сближаются (в), то отдвигаются друг от друга (г).





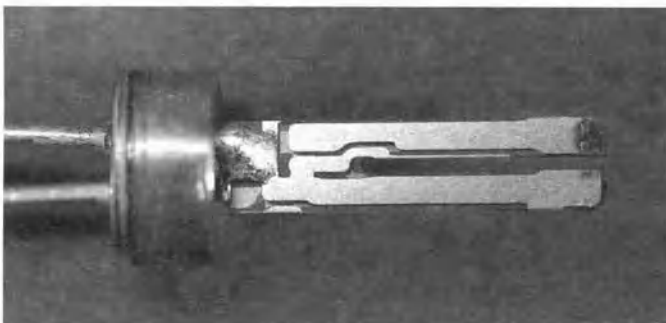
**Рис. 9.1.9.** В этих наручных часах кристалл кварца спрятан в серебряном цилиндре в правой нижней части (виден под секундной стрелкой). Тщательно отполированный и настроенный на определенную частоту, кристалл поддерживает точность хода часов с погрешностью не более одной секунды в месяц.

ханически реагирует на электрическое воздействие и электрически — на механическое. Благодаря этой связи между механическими и электрическими свойствами кристаллический кварц представляет собой пьезоэлектрический материал, идеально подходящий для электронных часов.

Для поддержания вибрации кристалла в схеме используется электрический сигнал (рис. 9.1.9). Подобно тому, как тщательно рассчитанными толчками можно до бесконечности раскачивать качели, так и скрупулезно рассчитанный генератор электрических колебаний заставляет кристалл бесконечно вибрировать. При каждом колебании кристалл теряет так мало энергии, что для поддержания вибрации в каждом цикле требуется совершить совсем маленькую работу.

Часовой механизм также воспринимает вибрацию кристалла с помощью электричества. Всякий раз, когда половинки кристалла сдвигаются или расходятся, кристалл испытывает механическое напряжение и испускает электрический импульс. Эти импульсы могут управлять электродвигателем, который перемещает часовые стрелки, или служить в качестве входных данных для электронного чипа, который измеряет время путем подсчета импульсов. Кварцевые кристаллы для часов тщательно откалиброваны и отполированы для того, чтоб они вибрировали на строго определенных частотах. Чем тоньше кристалл, тем быстрее он вибрирует — потому что уменьшается масса и растет возвращающая сила. Можно сказать, что кристаллы должны быть “настроены” подобно музыкальным инструментам, чтобы соответствовать очень строгим требованиям.

Хотя большинство крошечных кристаллов кварца вибрирует миллионы раз в секунду, обычные часовые кристаллы колеблются с частотой  $2^{15}$  Гц, то есть 32 768 Гц. Такая относительно низкая частота продлевает жизнь батарейки, потому что на подсчет каждого импульса расходуется некоторое количество ее энергии. Для снижения частоты вибрации кристалла из него вырезают центральную часть, чтобы ослабить возвращающую силу и замедлить колебания (рис. 9.1.10). Настраиваемый резонансный генератор, который получается в результате, аккуратно металлизуют, чтобы часовой механизм мог взаимодействовать с генера-



**Рис. 9.1.10.** Этот часовой кристалл, имеющий форму крошечного камертона, вибрирует с частотой 32 768 раз в секунду. Края “камертона” обгорели, потому что при настройке частоты колебаний использовался лазерный луч.

тором с помощью электрических сигналов. Затем кварцевый генератор настраивают ровно на 32 768 Гц, для чего удаляют (выжигают) часть металла с помощью лазерного луча. Кварцевый резонатор, работающий с вдвое меньшей частотой (16 384 Гц), сделал бы часы более энергоэффективными, но они были бы большего размера и вибрировали бы с частотой, которую некоторые люди, особенно дети, были бы в состоянии услышать!

## Атомные часы

---

Точность кварцевых часов удовлетворяет почти всем требованиям, кроме самых жестких. Да, в некоторых случаях необходима еще более высокая точность измерения времени, и в самых точных из существующих часов используются атомы и атомные структуры.

Подобно тому, как астрономические часы основываются на движении небесных тел по орбитам, атомные часы основаны на движении электронов и ядер в атомах. Атомы настолько малы, что движение и поведение частиц внутри атома подчиняется законам странного мира квантовой физики. В то время как планеты Солнечной системы могут обращаться вокруг Солнца по самым разным орбитам, в атоме электроны способны вращаться вокруг положительно заряженного центра атома, его ядра, только по орбитам, строго определенным. Количество и параметры разрешенных орбит зависят только от количества электронов и других частиц в атоме; таким образом, два атома с одинаковыми компонентами имеют идентичные разрешенные орбиты. Например, у одного атома цезия точно такие же разрешенные орбиты, как у любого другого атома цезия.

Квантовая структура атома определяет спектр длин волн излучения, которое атом может поглощать и излучать. Как мы увидим в главе 12, атом может поглощать или излучать только такой свет, длина волны которого подходит для того, чтобы перевести атом из одного разрешенного состояния с соответствующей конфигурацией орбит в другое. В результате атомы поглощают и испускают излучение только с определенной длиной волны.

Свет представляет собой электромагнитные колебания, так что помимо длины волны он также имеет частоту. Частота излучения обратно пропорциональна длине волны. Таким образом, атомы ведут себя избирательно не только в отношении длин волн, но и в отношении частот поглощаемого и испускаемого излучения. Такая избирательность атомов дает возможность использовать их для измерения времени.

В подходящих условиях атомы будут испускать свет одной из допустимых частот, и это излучение можно использовать в качестве счетчика времени для электронных часов. Кроме того, атомы можно подвергать воздействию света от другого источника, регулируя его частоту и настраивая ее так, чтобы атомы начали поглощать свет. Обе эти схемы используются в атомных часах.

Разумеется, в атомах не существует ни трения, ни других явлений, осложняющих работу остальных видов часов, поэтому из атомов получают исключительно точные измерители времени. Частоты некоторых атомных переходов настолько строго ограничены, что при частоте  $10^{15}$  Гц атом может распознать разницу в 1 Гц или даже меньше. Благодаря такой точности одна секунда определяется как промежуток времени, в течение которого совершается 9 192 631 770 колебаний электромагнитного излучения, поглощаемого атомами цезия, а метр — как расстояние, пройденное светом в вакууме за  $1 / 299\,792\,458$  секунды. Таким образом, метр (единица длины) теперь официально определяется в терминах времени и скорости света. Время и пространство действительно тесно связаны.

В современных атомных часах в качестве счетчика времени используют цезий, рубидий или водород. Такие часы настолько точны, что отстают или "убегают" всего на 1 секунду каждые 10 миллионов лет. Но в некоторых случаях даже эта точность недостаточна, поэтому ученые пытаются разработать еще более точные часы. В настоящее время проводятся исследования с захваченными и изолированными атомами, цель которых — снизить погрешность до 1 Гц на  $10^{20}$  Гц. Часы такой точности за все время, прошедшее с момента создания Вселенной, ошиблись бы не более чем на несколько тысячных долей секунды.

---





## 9.2 Музыкальные инструменты

Музыка — важная часть человеческого самовыражения. Конечно, что считать, а что не считать музыкой — до некоторой степени вопрос вкуса, но это понятие всегда включает в себя звук и часто — музыкальные инструменты. В этом разделе мы рассмотрим звук, структуру музыки, а также несколько инструментов: скрипку, орган и барабан. Будучи представителями трех наиболее распространенных типов инструментов — струнных, духовых и ударных, эта тройка должна помочь нам понять, как устроены все остальные.

### Звук и музыка

Чтобы понять, как работают музыкальные инструменты, нам нужно вначале побольше узнать о звуке и музыке. В воздухе звук от источника распространяется в виде акустических волн — чередующихся областей сжатия и разрежения. Когда звук проходит рядом с вами, давление воздуха в ухе колеблется вверх-вниз относительно атмосферного давления. Даже когда эти колебания имеют амплитуду меньше одной миллионной доли атмосферного давления, вы слышите их как звук.

Когда колебания начинают повторяться, вы слышите звук, высота которого определяется частотой колебаний. “Высота” звука — это его частота. Высотный диапазон баса простирается от 80 до 300 Гц, сопрано — от 300 до 1100 Гц. Музыкальные инструменты могут производить звуки в гораздо более широком диапазоне частот, но мы воспринимаем ухом только те, которые лежат в интервале от 30 до 20 000 Гц, и этот диапазон сужается по мере того, как мы становимся старше.

Чаще всего музыка строится на интервалах — отношении частот двух различных звуков. Это отношение рассчитывается как частное от деления частоты одного звука на частоту другого. Наш слух особенно чувствителен к интервалам, причем пары с равными интервалами звучат довольно похоже друг на друга. Например, пара звуков с высотами 440 и 660 Гц звучит похоже на пару 330 и 495 Гц, потому что у обеих пар интервал равен  $3/2$ .

Интервал  $3/2$  благозвучен для большинства слушателей и широко распространен в европейской музыке, где его называют квинтой. С квинты начинается известная английская детская песенка *Twinkle, Twinkle, Little Star* (а также, например, хор “Улетай на крыльях ветра” из оперы А. П. Бородина “Князь Игорь”). Если у вас хороший слух, вы можете начать пение с любого звука и затем легко найти второй тон, составляющий  $3/2$  от частоты первого. Наиболее важный интервал практически в любой музыкальной системе —  $2/1$ , или октава. Звуки, которые отличаются один от другого в два раза по частоте, ощущаются нашим ухом как настолько похожие, что мы часто воспринимаем их как один и тот же. Когда мужчина и женщина пытаются петь в унисон, они на самом деле часто поют с интервалом в октаву (или две) и могут практически не ощущать разницу в высоте тона, кратную двум или четырем.

1 В дополнение к своему вкладу в математику, геометрию и астрономию греческий математик Пифагор (ок. 580–500 до н. э.) был, пожалуй, первым человеком, который использовал математику, чтобы установить взаимосвязь интервалов, высоты звука и длину вибрирующей струны. Пифагор и его последователи заложили основу для нотного строя, до сих пор используемого в западной музыке.

Октава настолько важна, что она структурирует весь диапазон частот, который слышит человеческое ухо. Большинство тончайших взаимодействий тонов в музыке происходит в интервалах меньше октавы, то есть звуки отличаются по частоте менее чем в два раза. В самых разных музыкальных традициях музыка строится на интервалах, лежащих в пределах одной октавы, например  $5/4$  и  $3/2$ . Выбрав звук конкретной стандартной высоты, на определенных интервалах от него строят другие тона. Потом эта последовательность повторяется на октаву выше и ниже для создания полного звукоряда (об истории звукоряда см. 1).

В европейской музыке используется звукоряд, построенный вокруг звука, который обозначается как  $a_1$  ("ля" первой октавы) и имеет стандартную высоту 440 Гц. В интервалах с коэффициентами  $9/8$ ,  $5/4$ ,  $4/3$ ,  $3/2$ ,  $5/3$  и  $15/8$  выше  $a_1$  лежат шесть звуков:  $b_1$ ,  $c\#_2$ ,  $d_2$ ,  $e_2$ ,  $f_2$  и  $g\#_2$ . Аналогичные группы из шести звуков располагаются вверх от  $a_2$  ("ля" второй октавы, 880 Гц) и вверх от  $a$  (220 Гц, "ля" малой октавы). Как видим, частота тона  $a_2$  в два раза выше, чем тона  $a_1$ , а частота тона  $a$  вдвое ниже, чем у  $a_1$ . По такому же принципу построена вся система интервалов от  $A_1$  ("ля" контроктавы, 55 Гц) до  $a_5$  ("ля" пятой октавы, 7040 Гц).

На самом деле европейская музыка нового времени строится на 12 нотах и 12 математически равных интервалах между ними. Эта система называется равномерно темперированным строем и является основой европейской музыки уже на протяжении нескольких столетий.

## Вибрирующая скрипичная струна

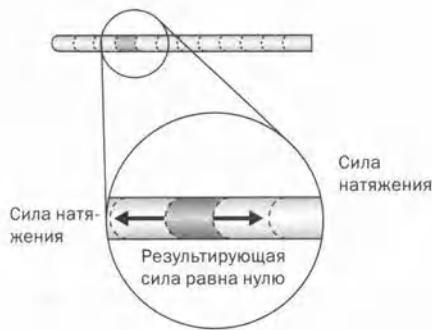


Рис. 9.2.1. Натянутую скрипичную струну можно рассматривать как состоящую из множества отдельных частей. Когда струна выпрямлена, две силы, действующие на данный отрезок со стороны соседних, полностью уравновешиваются, результирующая сила равна нулю.

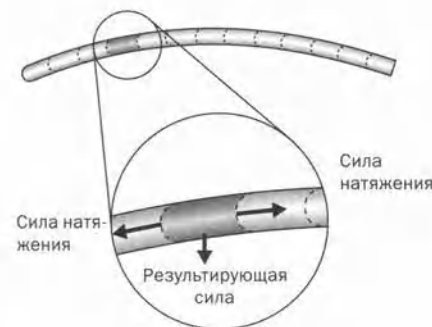


Рис. 9.2.2. Когда струна изогнута, две силы, действующие на данный отрезок со стороны соседних, не направлены точно в противоположные стороны и не уравновешивают друг друга. На отрезок действует результирующая сила, которая не равна нулю.

Звуки, которые производит скрипка, начинаются как колебания ее струн. Но сами по себе эти струны вялые и не имеют определенной формы, для того чтобы их можно было структурировать, их надо опереть одним концом на порожек в верхней части грифа, а другим — на подставку на корпусе инструмента. При помощи колков скрипач растягивает струны, прилагая к ним растягивающие внешние силы, что придает каждой струне равновесную форму: прямую линию.

Чтобы понять, почему прямая скрипичная струна находится в равновесии, представьте ее в виде множества отдельных отрезков, которые соединены друг с другом в цепочку (рис. 9.2.1). На каждый отрезок струны действуют две противоположно направленные силы натяжения, которые ее растягивают; каждый из соседних отрезков тянет наш отрезок к себе. Поскольку натяжение равномерно по струне, сумма двух растягивающих сил равна нулю: они равны, но направлены в противоположные стороны. Поскольку результирующая сила, действующая на каждый отрезок, равна нулю, прямая струна находится в равновесии.

Однако когда струна изгибается, равнодействующая сил натяжения уже не будет равна нулю (рис. 9.2.2). Эти силы по-прежнему равны, но они направлены уже не вдоль одной и той же прямой, а под небольшим углом друг к другу. Таким образом, на каждый отрезок действует небольшая результирующая сила.

Результирующие силы, действующие на отрезки струны, являются возвращающими, потому что они стремятся выпрямить струну. Если вы оттянете и затем отпустите струну, возвращающие силы заставят ее вибрировать относительно равновесного состояния (прямой линии) в естественном резонансе. Но возвращающие силы имеют особую природу: чем сильнее вы отклоните струну от прямой, тем больше будет возвращающая сила, действующая на каждый ее отрезок. В сущности, возвращающие силы являются силами упругости — они возрастают пропорционально отклонению струны, — и, стало быть, струна является одной из форм гармонического осциллятора!

Правда, струна намного сложнее, чем маятник или балансирующее кольцо. Она может изгибаться и вибрировать во многих различных режимах или формах искажения, каждый со своим собственным периодом колебаний. Тем не менее струна сохраняет наиболее важное свойство гармонического осциллятора: период каждого вида колебаний не зависит от их амплитуды. Таким образом, период колебаний скрипичной струны не зависит от того, насколько сильно она вибрирует. Подумайте, насколько сложней было бы играть на скрипке, если бы высота звука зависела от его громкости!

Скрипичная струна имеет один основной простейший тип колебания, который называется нормальной модой или главной колебательной модой. В этом режиме вся струна поочередно выгибается то в одну, то в другую сторону (рис. 9.2.3). Ее кинетическая энергия достигает максимума, когда она на мгновение принимает равновесную форму прямой, а потенциальная энергия (упругая потенциальная энергия струны) максимальна, когда струна в это мгновение останавливается, чтобы выгнуться в другую сторону. Середина струны имеет самую большую амплитуду колебаний (нечность), а ее концы (колебательные узлы, или ноды) остаются фиксированными. В каждый момент времени форма струны является частью гладкой кривой, которая описывается тригонометрической функцией синус.

В нормальной моде скрипичная струна ведет себя как гармонический осциллятор. Как и у любого осциллятора, ее период колебаний зависит только от возвращающей силы и инерции. Чем выше жесткость скрипичной струны и чем меньше ее масса, тем большей будет частота ее основных колебаний и тем выше соответствующий ей основной тон.

У скрипки четыре струны, которые различаются упругостью и толщиной (массой) и, как следствие, имеют разный основной тон. В настроенной скрипке струны производят снизу вверх соответственно звуки *g* — “соль” малой октавы (196 Гц), *d1* — “ре” первой октавы (294 Гц), *a1* — “ля” первой октавы (440 Гц) и *e2* — “ми” второй октавы (660 Гц). Четвертая струна *g* — самая толстая и колеблется медленнее остальных. Обычно ее делают из натуральных жил в металлической оплетке. В то же время первая струна *e2* вибрирует быстрее всех прочих, поэтому должна иметь небольшую массу. Эти струны изготавливают из тонкой стальной проволоки.

Скрипку настраивают, регулируя натяжение струн с помощью колков, находящихся в шейке грифа и так называемых “машинок” в струнодержателе (на противоположном от колков конце струны). Натягивание струны делает ее более жесткой, поскольку увеличивается как внешние силы, работающие на растяжение каждого отрезка, так и их равнодействующая, которая действует при отклонении от равновесия. Так как температура, влажность и другие факторы могут изменить натяжение струны, скрипку перед каждым исполнением нужно подстраивать.

Основной тон струны зависит также от ее длины. Укорачивая струну, скрипач делает ее более жесткой и уменьшает ее массу, поэтому основной тон становится более высоким. Струна становится более жесткой, потому что более короткая струна при выведении из состояния равновесия искривляется более резко и, следовательно, на каждый ее отрезок действует большая результирующая сила. Таким образом, чтобы повысить высоту звука, который издает струна, достаточно прижать ее к грифу в том или ином месте, таким образом укоротив вибрирующую часть. Азы мастерства скрипача — точно знать, где именно прижать струну к грифу, чтобы извлечь звук определенной высоты.

Если дуга, которую образует струна в нормальной моде, своими очертаниями напоминает вам волну, ничего удивительного — это и есть волна. Это механическая волна — собственные колебания распределенной системы относительно ее устойчивого равновесия. К распределенным системам относятся струна, стержень или поверхность озера — то есть системы, состоящие из множества частей, движущихся с ограниченной независимостью. Поскольку эти части влияют друг на друга, распределенная система, имеющая равновесную форму, демонстрирует собственные колебания, которые включают одновременное движение многих ее частей; она производит механические волны.

Скрипичная струна, состоящая из бесчисленных связанных отрезков и имеющая устойчивую равновесную форму, тоже образует такие волны. Нормальная мода струны является самой простой разновидностью волны, стоячей волной — так называется волна, в которой все узлы и пучности остаются на месте. Основная форма стоячей волны не меняется со временем, она просто ритмично скользит вверх и вниз с определенной частотой и амплитудой, т. е. максимальным смещением. Самое главное, что стоячая волна не перемещается вдоль струны. Хотя эта волна охватывает всю струну, связанные с ней колебания перпендикулярны струне и, следовательно, перпендикулярны самой волне. Волна, в которой основное колебание перпендикулярно самой волне, называется поперечной. Волны струнных и ударных музыкальных инструментов, равно как и волны на поверхности воды, — все это поперечные волны\*.

Нормальная мода



Рис. 9.2.3. Эта струна колеблется между двумя фиксированными точками в режиме нормальной моды. Струна движется целиком, поднимаясь и опускаясь как единый гармонический осциллятор. Она образует стоячую волну.

\* Разумеется, речь идет лишь о стоячих волнах на поверхности воды. Волны, набегающие на берег, трудно назвать чисто поперечными — ведь вода в этом случае движется не только вверх и вниз, но также и берегу и от него. Однако скрипичные струны движутся строго поперечно, поэтому их колебания проще изучать, чем более сложное движение морских волн у берега.

Вторая гармоника



Третья гармоника



**Рис. 9.2.4.** Эти струны колеблются между двумя фиксированными точками во второй и третьей гармониках. Струны колеблются как два или три сегмента, совершая циклы соответственно в два или три раза быстрее основной частоты. Обе струны образуют стоячие волны.

Нормальная мода — не единственная в колебательном движении скрипичной струны. Возможны также колебательные моды более высокого порядка, в которых струна вибрирует как цепочка коротких струн, выгибающихся в противоположных направлениях (**рис. 9.2.4**). Каждая из этих колебательных мод более высоких порядков представляет собой стоячую волну фиксированной формы, которая ритмично поднимается и опускается со своей собственной частотой и амплитудой.

Например, при определенном воздействии на нее струна может колебаться в противоположных направлениях как две половины дуги, отделенных друг от друга неподвижным колебательным узлом. В этой моде скрипичная струна не только колеблется так, как будто состоит из двух равных частей, у нее и высота тона будет такой же, какой была бы у половины струны. В целом частота колебаний струны обратно пропорциональна ее длине, так что если точно посередине струны слегка прижать ее (то есть разделить ее на два вибрирующих отрезка), частота звука удвоится. Колебательное движение с частотой, кратной основной, называется гармоникой, а соответствующий ей звук — обертоном. Таким образом, колебания струны, разделенной на два отрезка, происходит со второй гармонической частотой и называются второй гармоникой.

Определенные исполнительские приемы могут “разделить” колеблющуюся струну и на три равных отрезка, причем частота звука при этом будет в три раза выше основного тона (второй обертон). Интервал между вторым обертоном и основным тоном составит октаву плюс квинту ( $2/1$  умножить на  $3/2$ ). Основной тон вкупе с первым и вторым обертоном весьма благозвучен.

Из скрипичной струны можно извлечь и более высокие обертоны, но тут важно то, что струна не может колебаться только в одной моде практически никогда. Например, струна, которая колеблется в своей нормальной моде, должна в то же время колебаться во второй гармонике, то есть издавать одновременно тон и обертон.

Обертоны имеют большое значение, потому что при игре на скрипке происходит возбуждение колебаний сразу во многих модах. Звук скрипки, таким образом, представляет собой сложную смесь основного тона и обертонов, которая называется тембр. Структура тембра различна у различных музыкальных инструментов, отчасти и поэтому все они звучат по-разному.

Когда струна колеблется в нескольких модах одновременно, ее форма и движения имеют очень сложный характер. Отдельные стоячие волны накладываются друг на друга — процесс, известный как суперпозиция, или наложение. Каждая колебательная мода имеет свою амплитуду и, следовательно, свой вклад в тембр струны.

Хотя эти отдельные волны прекрасно сосуществуют в струне, практически не влияя друг на друга, в итоге сложная форма струны становится результатом наложения отдельных волн. Помимо сложности, форма струны еще и существенно меняется со временем. Это происходит потому, что разные гармонические волны колеблются с разной частотой и результат их наложения меняется во времени.

### Смычок и щипок

Вы играете на скрипке, проводя смычком по струнам. Смычок состоит из пучка конского волоса, натянутого на древяшко. Грубый конский волос, двигаясь поперек струны, создает силу трения. Но самое главное тут в том, что максимальная сила трения покоя между волосом и струной значительно превосходит силу трения скольжения между ними\*.

Когда волос смычка трется о струну, он зацепляет струну и сдвигает ее вперед благодаря трению покоя. В конце концов возвращающая сила становится больше максимальной силы трения покоя, и струна начинает скользить назад. Так как волос смычка создает совсем незначительное трение скольжения, струна с легкостью завершает половину колебательного цикла. Но когда она останавливается, чтобы поменять направление, смычок вновь подхватывает ее и снова двигает вперед. Этот процесс повторяется снова и снова.

Приводя в движение струну, смычок совершает над ней механическую работу, но энергия при этом неравномерно распределяется среди колебательных мод.

\* Для усиления этого эффекта используется канифоль — стекловидная смола желто-красного цвета, которая наносится на конский волос смычка и затрудняет проскальзывание смычка по струнам.

Если всю энергию получает только одна мода, или, точнее, моды собственных колебаний струны, то возникает явление резонанса. Подобно тому, как не слишком сильными, тщательно просчитанными толчками можно раскачать качели и в конце концов поднять их высоко над землей, так и тщательно просчитанными ударами смычка можно заставить скрипичную струну активно колебаться. Похожие ритмические усилия порой вызывают сильную вибрацию и других объектов. Самые известные примеры этого явления — вибрация хрустального бокала или крушение моста через пролив Такома возле Сиэтла, штат Вашингтон (см. 2), однако бывают и другие случаи (см. 3 и 4). Отклик бокала на определенный тон также является примером ответной резонансной вибрации — передачи колебательной энергии между двумя системами, имеющими общую частоту собственных колебаний.

Количество энергии, которое смычок передает каждой колебательной моде, зависит от того, в каком месте он пересекается со струной. Если вы проведете смычком по струне вблизи подставки, то получится «жесткий» характерный звук с большим количеством обертонов. Сдвинув смычок ближе к середине струны (в сторону грифа), вы уменьшаете ее кривизну, снижаете вклад высокочастотных обертонов и получаете более мягкий звук. Перемещение смычка к концу струны (от грифа) увеличивает ее кривизну, усиливает гармонические колебания и заставляет скрипку звучать более сухо и ярко.

Если же отложить смычок и зацепить струну пальцем, то звук тоже зависит от содержания гармоник, а значит, и от того, в каком месте выполняется щипок. Но этот звук в корне отличается от звука, извлекаемого смычком. Разница заключается в огибающей звука — то есть кривой, описывающей изменение звука во времени. В огибающей звука можно выделить три периода: атака — начальное нарастание громкости; задержка — уровень постоянной громкости; спад — ослабление и затухание звука. Щипок струны создает огибающую кривую, состоящую из короткой резкой атаки, сразу за которой следует постепенное затухание. В противоположность этому смычок порождает огибающую, которая характеризуется плавной атакой, устойчивой задержкой, а затем постепенным спадом. Мы распознаем отдельные инструменты не только по тембру, но и по огибающим звука.

## Органная труба: вибрирующий воздух

Как и в скрипке, звук в органе возникает благодаря колебаниям звучащего тела. Однако в данном случае эти колебания представляют собой колебания самого воздуха. Органная труба — это открытый с обеих сторон и заполненный воздухом полый цилиндр. Так как воздух защищен жесткими стенками трубы, его давление может колебаться относительно атмосферного давления и он способен проявлять собственный резонанс.

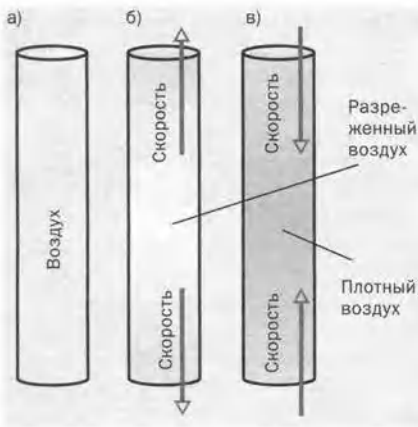
В своей главной колебательной моде воздух движется относительно середины трубы (рис. 9.2.5) подобно двум брускам на пружине. Когда воздух движется с двух сторон к середине трубы, плотность воздуха там повышается и возникает разница давлений. Вследствие того что давление в середине трубы выше, чем у ее концов, воздух устремляется прочь от центра. Он перестает двигаться внутрь и начинает двигаться наружу. В результате плотность воздуха в середине падает и возникает уже обратный дисбаланс давления. Поскольку давление там становится меньше, чем у концов трубы, воздух снова устремляется внутрь, к центру. Он перестает двигаться наружу и начинает двигаться внутрь. Цикл повторяется. Кинетическая энергия достигает максимума всякий раз, когда система проходит через состояние равновесия, а потенциальная энергия (потенциальная энергия давления воздуха) — когда воздух останавливается перед тем, как повернуть обратно.

Этот воздух колеблется относительно состояния устойчивого равновесия, которое характеризуется равномерной плотностью и атмосферным давлением и, очевидно, испытывает действие возвращающей силы. Нас уже никак не может удивить тот факт, что эти силы похожи на пружину и что столб воздуха является еще одной разновидностью гармонического осциллятора. А раз так, частота колебаний воздуха зависит только от возвращающей силы и от инерции. Делая столб воздуха более жестким или уменьшая его массу, можно ускорить его колебания, т. е. увеличить их частоту.

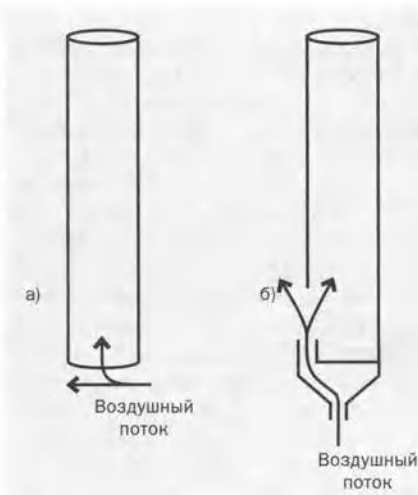
2 Мост через пролив Такома обрушился в ноябре 1940 г. из-за автоколебаний, возникших при сильном ветре. Еще в процессе строительства этот автомобильный мост начал проявлять необычный собственный резонанс: полотно моста скручивалась вдоль продольной оси, так что одна полоса движения поднималась, в то время как другая опускалась. Во время бури автоколебательный режим способствовал поглощению энергии ветра этой модой: амплитуда колебаний стала быстро расти, и в конце концов мост был разорван.

3 В обычной чашке кофе плещется с резонансной частотой несколько раз в секунду. К сожалению, когда вы несете чашку, ее легко невольно встряхнуть. При этом резонансный перенос энергии заставляет кофе колебаться так энергично, что напиток выплескивается из чашки. Когда вы пытаетесь не расплескать кофе на ходу, вы на самом деле стараетесь избежать встряхивания на его резонансной частоте или даже погасить колебания поверхности, которые наблюдаете.

4 Многие анатомические органы человека могут колебаться относительно состояния устойчивого равновесия и проявлять собственный резонанс. Ходьба или бег могут вызвать колебания этих частей тела вследствие резонансной передачи энергии. Если собственная резонансная частота части тела совпадает с частотой шага, энергия бега или ходьбы перейдет в колебательную. Женщины часто ощущают дискомфорт во время бега, потому что их грудь начинает энергично колебаться из-за неудачного совпадения частоты шагов бега с основной колебательной модой груди. Изобретение спортивных бюстгалтеров сделало бег более удобным, повысив жесткость всей механической системы и, следовательно, сдвинув все ее собственные колебания в сторону более высоких частот. Резонансная частота груди, поддерживаемой бюстгалтером, настолько выше, чем частота шагов при беге, что резонанс не возникает, и, следовательно, бегунья испытывает гораздо меньший дискомфорт.



**Рис. 9.2.5.** В открытой с обеих сторон трубе (а) воздух колеблется вверх-вниз относительно ее середины. (б) В течение половины цикла воздух движется наружу и создает в середине область низкого давления, (в) в течение второй половины цикла воздух движется внутрь трубы и создает в середине область повышенного давления.



**Рис. 9.2.6.** (а) Воздух, поступающий в нижнюю часть открытой трубы, будет вести себя так же, как любой другой воздух, который уже есть в трубе. Если воздух в трубе колеблется, этот эффект добавит колебаниям энергии; (б) отверстие в нижней части трубы органа по практическим соображениям делается сбоку.

Эти характеристики зависят от длины органной трубы. Более короткая труба не только содержит меньшую массу воздуха, чем длинная, она также сильнее сопротивляется любому движению воздуха как к центру трубы, так и из нее. Поскольку у короткой трубы меньше объем, давление внутри нее поднимается и падает более резко, что приводит к росту возвращающей силы, действующей на движущийся воздух. Вместе эти эффекты заставляют воздух в коротких трубах вибрировать чаще, чем в длинных. В целом частота колебаний органной трубы обратно пропорциональна ее длине.

К сожалению, масса воздуха, колеблющегося в трубе, также зависит от средней плотности воздуха, поэтому даже небольшое изменение температуры или других погодных условий влияет на период колебаний трубы и, следовательно, на высоту звука. К счастью, все эти обстоятельства действуют на все трубы органа одновременно, так что инструмент продолжает держать строй. Тем не менее эти изменения могут быть слышны, когда орган играет вместе с оркестром.

Как вы уже догадываетесь, основная колебательная мода (нормальная мода) воздуха в органной трубе — это еще один вариант стоячей волны. Воздух в трубе представляет собой распределенную систему, характеризующуюся состоянием устойчивого равновесия, и смещение, обусловленное нормальной модой, имеет определенную форму, которая не меняется во времени; оно просто ритмически поднимается и опускается.

Однако волна в трубе в этом случае представляет собой периодически сменяющиеся друг друга циклы сжатия и разрежения, а не смещения из стороны в сторону, как это было со скрипичной струной. На самом деле все связанные с волной колебания идут вдоль трубы и, следовательно, вдоль самой волны. Волна, в которой основное колебание параллельно самой волне, называется продольной. Воздушные волны, в том числе внутри органной трубы и других духовых инструментов, а также звуковые волны на открытом воздухе — все это продольные волны.

## Играем на органе

Чтобы заставить воздух в трубе колебаться, орган использует резонансный перенос энергии. Этот процесс начинается с подачи воздуха через нижнее отверстие трубы (**рис. 9.2.6, а**), которое, правда, по практическим соображениям обычно расположено не на нижнем торце, а на боковой стенке трубы (**рис. 9.2.6, б**). Поступающий через отверстие воздух легко отклоняется в ту или другую сторону, стремясь следовать за воздухом, который уже движется в трубу или из трубы. Если воздух внутри трубы колеблется, то вновь поступивший воздух начинает с идеальной синхронностью колебаться вместе с ним и усиливает вибрацию.

Этот процесс следования новых порций воздуха за предыдущими настолько эффективно усиливает колебания, что они могут возникнуть даже от случайного шума, который всегда присутствует в трубе. Так и возникает звук, когда меха органа вдвывают в трубу воздух. Стоит колебаниям начаться, их амплитуда очень быстро растет и продолжает увеличиваться, пока энергия не уйдет из трубы в форме звука и тепла так же быстро, как она поступила туда со сжатым воздухом. Чем больше воздуха вдвывается в трубу каждую секунду, тем больше энергии он поставляет в трубу и тем интенсивнее вибрация.

Как и скрипичная струна, органная труба может поддерживать несколько режимов вибрации. В нормальной моде весь столб воздуха в трубе колеблется как одно целое. В колебательных модах высших порядков этот столб воздуха колеблется как колонна из коротких столбов воздуха, движущихся в переменных направлениях. Поскольку труба имеет постоянную ширину, эти колебания происходят при гармониках основной частоты. Когда воздушный столб вибрирует как две половины колонны, высота звука (и частота) ровно вдвое больше, чем в нормальной моде. Когда он вибрирует в виде трех третей колонны, высота ровно в три раза больше, чем основная. И так далее.

Но столб воздуха внутри трубы может колебаться сразу в нескольких режимах. Как и у скрипичной струны, стоячие волны накладываются, основной тон и обертоны звучат вместе. От формы органной трубы и места подачи воздуха зависит содержание гармоник и, следовательно, тембр. Те или иные трубы могут в известной степени имитировать различные инструменты. Чтобы звучать по-

добно флейте, труба должна производить главным образом основной тон, сдерживая обертоны. Чтобы звук походил на звук кларнета, обертоны должны звучать гораздо более явно. Органная труба слишком медленно наполняется во время атаки, поэтому орган не способен имитировать щипковые инструменты. Тем не менее хороший мастер может построить орган, способный подражать удивительно большому количеству инструментов.

## Вибрирующая поверхность: барабан

Барабанная мембрана — это еще один вид распределенной системы, характеризующейся состоянием равновесия и наличием возвращающей силы, но у нее есть очень важное отличие: колебания этой системы не являются гармоническими.

Скрипичные струны и органные трубы вполне можно рассматривать как одномерные системы, которые легко можно поделить на две или три части, чтобы произвести первые или вторые обертоны. Когда эти инструменты звучат в составе оркестра вместе с другими одномерными инструментами, их звучание органично соединяется в ансамбль, если они используют один и тот же основной тон и одни и те же гармоники.

Но поскольку барабанная мембрана является двумерной системой (как всякая поверхность), она не так легко делится на части, которые бы были аналогичны целому. В результате частота обертоновых колебаний — аналогов высших гармоник — не связана прямой зависимостью с основным тоном мембраны. Из всех мембранофонов (то есть ударных инструментов, в которых звучащим телом является натянутая мембрана) лишь литавры способны порождать созвучные основному тону обертоны.

Рисунок 9.2.7 иллюстрирует основной (а) и пять нижних обертоновых колебательных мод (б — е) барабана. Каждая колебательная мода представляет собой стоячую волну, однако узлы ее являются не точками, а линиями — кривыми или прямыми. Основная мода (а) имеет только один узел, проходящий по внешнему краю мембраны, однако у обертоновых мод есть дополнительные узлы, расположенные на поверхности мембраны. В каждой колебательной моде эти узлы остаются неподвижными, в то время как остальная часть поверхности колеблется вверх и вниз, так что “выпуклости” и “впадины” по очереди меняются местами. Частоты обертоновых колебаний даны по отношению к частоте основного тона (об истории изучения колеблющихся поверхностей см. 5).

Удар по мембране заставляет ее колебаться одновременно в нескольких модах, поэтому барабан производит одновременно несколько звуков. Амплитуда, а значит, и громкость звука каждой моды зависит не только от силы, но и от места удара. Когда вы ударяете по центру, колебания происходят в основном в аксиально-симметричных модах (рис. 9.2.7, а, г). Если бить ближе к краю — то в несимметричных модах (б), (в), (д) и (е).

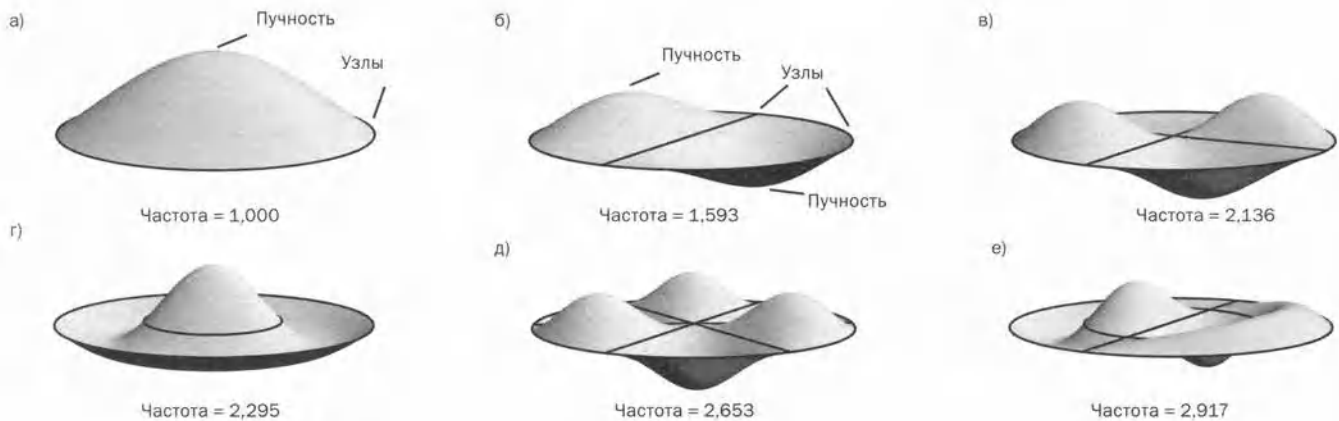


Рис. 9.2.7. Шесть низших колебательных мод барабанной мембраны, в том числе основной тон (а) и обертоны (б — е). Частоты рассчитаны по отношению к частоте основного тона, принятой за единицу.

5 В 1809 г. Французская академия наук объявила конкурс на объяснение замысловатых узоров, которые наблюдаются на вибрирующей поверхности. На этот призыв отозвалась только французская женщина-математик Софи Жермен (1776–1831). В то время женщина не могла получить формального образования в области математики и изучала предмет самостоятельно по книгам и в переписке с ведущими математиками, которую вела под псевдонимом Антуан-Огюст Леблан. Жермен потребовалось три попытки, но в 1816 г. она все-таки была удостоена премии. При этом — опять же из-за того, что она была женщиной, — Софи даже не присутствовала на церемонии. Выполненный ею анализ колебаний поверхностей, хотя и неполный, далеко опередил свое время, что особенно поразительно с учетом описанных выше обстоятельств. Ее наставнику Карлу Фридриху Гауссу удалось убедить Геттингенский университет присудить Жермен почетную ученую степень, однако Софи умерла от рака груди, так и не став профессором.

Литавры звучат особенно гармонично, когда удар колотушкой наносится не по центру, а сбоку — в этом случае амплитуда основной моды близка к нулю, а доминируют обертоны, особенно (б). Это объясняется тем, что основная мода производит звук настолько эффективно, что его колебательная энергия успевает рассеяться, прежде чем он может дать ощутимую громкость. Если вы не хотите получить всего лишь очень громкий “бум”, нужно ударить по литавре в стороне от центра так, чтобы долгоживущие колебания обертонов получили большую часть энергии и произвели большую часть звука. Основным тоном литавры считается ее первый обертон, на который ее и настраивают.

По правде говоря, на **рис. 9.2.7** изображены колебательные моды без учета влияния инерции воздуха на колебания мембраны. Поскольку воздух увеличивает инерцию мембраны, он уменьшает частоту всех колебательных мод, причем некоторых в большей степени, чем остальных. Из-за влияния воздуха барабан должен быть настроен в соответствии с изменениями температуры и погоды.

## Звук в воздухе

Во всех описанных выше колебаниях было бы не так уж много смысла, если бы мы не могли их слышать, поэтому настало время выяснить, как же инструменты производят звук. Начнем со звука как такового.

В начале этого раздела мы отметили, что звук в воздухе состоит из упругих волн — чередующихся областей сжатия и разрежения, которые быстро распространяются во все стороны от источника. В тот момент это, возможно, прозвучало загадочно, но сейчас мы уже понимаем эти волны как колебания протяженной системы, у которой есть состояние равновесия. В данном случае протяженной системой является воздух.

Если пренебречь гравитацией, воздух находится в состоянии устойчивого равновесия, когда его плотность повсюду одинакова. Если мы сдвинем равновесие, возникнет разность давлений, которая создаст возвращающие силы, работающие по принципу пружины. Эти силы вместе с инерцией воздуха приведут к возникновению ритмических колебаний — колебаний гармонического осциллятора. Локальные изменения давления вызывают волны, которые равномерно распространяются в определенном направлении и поэтому называются бегущими. Как и стоячие волны внутри органной трубы, бегущие волны в открытом воздушном пространстве относятся к продольным — то есть воздух колеблется в том же направлении, в каком распространяется звуковая волна.

Распространяющаяся через открытый воздух основная бегущая звуковая волна состоит из чередующихся областей высокой плотности (которые мы будем называть гребнями) и областей низкой плотности, которые называются впадинами (**рис. 9.2.8**). Хотя эти названия кажутся более подходящими для волн на поверхности воды, которые мы будем рассматривать в следующем разделе, в физике принято называть чередующиеся подъемы и спады любой волны соответственно гребнями и впадинами. И для стоячей, и для бегущей волны кратчайшее расстояние между двумя соседними гребнями называется длиной волны.

Гребни и впадины стоячей волны можно сравнить с прыжками вверх-вниз на месте — гребни становятся впадинами и впадины становятся гребнями. Однако гребни и впадины бегущих волн неуклонно двигаются в определенном направлении с определенной быстротой. Эта быстрота и направление движения вместе составляют скорость бегущей волны.

На **рис. 9.2.9** представлено пять изображений простой звуковой волны, движущейся вправо. Если мы проследим за плотностью воздуха в одной и той же точке пространства (сплошная вертикальная линия), она начинается с гребня (а), затем уменьшается (б), переходит во впадину (в), затем поднимается (г) и возвращается к гребню (д) в течение одного полного колебательного цикла. Но если мы будем следовать за одним и тем же гребнем (пунктирная линия) в течение долгого времени, он за один полный цикл сместится на одну длину волны вправо (а — д). Так как гребень перемещается на одну длину волны за время, равное периоду колебаний, а частота равна количеству циклов в единицу времени, скорость, с которой перемещается гребень, равна произведению длины волны на частоту:

$$\text{скорость волны} = \text{длина волны} \times \text{частота}$$

(9.2.1)



**Рис. 9.2.8.** Бегущая звуковая волна в воздухе представляет собой чередование областей высокой плотности (темные участки) и низкой плотности (светлые). Расстояние между соседними гребнями, быстрота и направление движения гребня определяют скорость волны.



Как ни удивительно, все звуковые волны распространяются в воздухе с одной и той же скоростью, независимо от длины волны и частоты. Причина в том, что длина звуковой волны всегда обратно пропорциональна частоте. Мы уже встречались с такой же обратной зависимостью для стоячей волны в органной трубе: если удвоить длину трубы и, соответственно, удвоить длину волны основного тона, частота этого колебания уменьшится в два раза. Даже когда воздух не ограничен трубой, он колеблется с частотой, обратно пропорциональной длине волны.

Благодаря этой необыкновенной обратной зависимости между длиной бегущей звуковой волны и ее частотой, из уравнения 9.2.1 следует также, что скорость распространения любой звуковой волны одинакова. Эта величина, известная как скорость звука в воздухе, составляет около 331 м/с в нормальных условиях (0 °С, 101 325 Па). И хотя это высокая скорость, но все-таки имеет место заметный интервал времени между моментом, когда ударник бьет в тарелки, и моментом, когда вы слышите звук на другой стороне концертного зала. Но к счастью — поскольку скорость звука не зависит от частоты, — вы слышите с такой же задержкой звуки всех остальных инструментов оркестра, и он по-прежнему звучит синхронно.

До сих пор мы исходили из того, что слушатель и источник звука неподвижны и находятся на постоянном удалении друг от друга, как обычно и бывает в концертном зале. Однако когда марширующий оркестр приближается или удаляется от слушателя, происходит нечто странное: наше ухо слышит, как звук то повышается, то понижается. Это изменение частот, получившее название эффект Доплера, объясняется тем, что до слушателя гребни волн доходят с частотой, которая отличается от частоты в месте их создания. Если инструмент и слушатель сближаются, то гребни доходят до слушателя с повышенной скоростью и соответственно увеличивается высота звука. Если же они отдаляются друг от друга, гребни доходят до слушателя с уменьшенной скоростью и звук понижается. К счастью, эффект Доплера почти незаметен на скоростях, незначительных по сравнению со скоростью звука, так что вы можете наблюдать уличные парады без особых проблем со звучанием.

## Превращение колебаний в звук

Любое возмущение, приводящее к изменению обычно однородной плотности воздуха, может производить бегущие звуковые волны. Инструменты испускают звук путем разрежения и сжатия близлежащего воздуха синхронно с их колебаниями. Пути решения этой задачи для разных инструментов отличаются, так что нам придется рассматривать их по отдельности. Как мы увидим, одним инструментам легче удается производить звук, чем другим.

Барабан производит звук, когда колебания его мембраны поочередно делают прилегающий воздух то более плотным, то более разреженным. Когда участки мембраны то поднимаются, то опускаются, они изменяют однородную плотность воздуха и таким образом порождают звуковые волны.

Однако воздух при любой возможности просто беззвучно уходит в сторону от мембраны, а это приводит к меньшим колебаниям плотности и понижает громкость. Например, когда мембрана испытывает один из пяти вариантов колебаний, показанных на рис. 9.2.7, воздух уходит от очередного поднимающегося пика в сторону очередной образующейся впадины. Высшим гармоникам все еще удастся породить звук, но уже менее эффективно, и колебательная энергия мембраны относительно медленно преобразуется в звуковую энергию.

Поскольку часть воздуха менее эффективно вовлекается в колебания высших гармоник мембраны, она сможет совершить множество колебательных циклов, прежде чем иссякнет ее колебательная энергия. Поэтому высшие гармоники дольше звучат, сохраняя определенную высоту. В противоположность этому воздух лишь с трудом уклоняется от основной колебательной моды, которая настолько эффективно попеременно сжимает и разряжает его, что успевает передать воздуху свою колебательную энергию в течение нескольких циклов. Вот почему основная колебательная мода барабана производит громкий звук неопределенной высоты — тот самый глухой “бум”, по которому мы опознаем барабан.

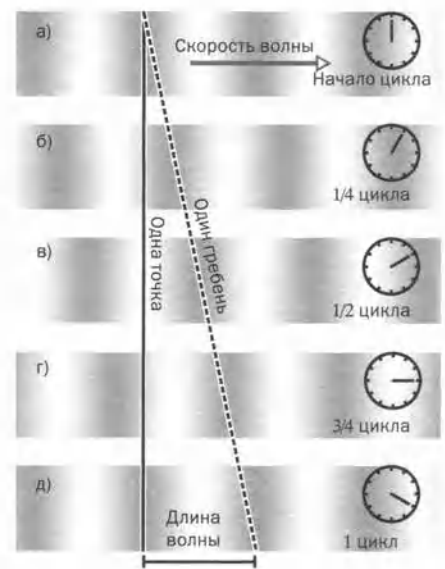


Рис. 9.2.9. Полный цикл звуковой волны через равные промежутки времени (а — д). В течение цикла давление в определенной точке пространства изменяется от высокого до низкого и опять до высокого (сплошная линия), а определенный гребень перемещается на одну длину волны вправо (пунктирная линия).



**Рис. 9.2.10.** Подставка скрипки передает энергию от вибрирующих струн верхней деке. Дека колеблется вверх-вниз, издавая звук. Часть звуковых волн выходит из скрипки через  $f$ -образные отверстия — эфы.



**Рис. 9.2.11.** Подставку поддерживают с одной стороны душка, а с другой — пружина. Когда струны вибрируют, подставка получает крутящий момент, который вызывает колебания верхней деки, что и создает звук.

Если воздух может уклониться от вибрирующей поверхности, то уж от струны — тем более. Лишь малая часть звука скрипки поступает непосредственно от вибрирующих струн; воздух просто их огибает. Вместо этого скрипка производит звук с помощью верхней деки (**рис. 9.2.10**). Струны передают свои колебательные движения деке, а дека толкает воздух, чтобы создать звук.

Большая часть колебательной энергии поступает в дека через подставку, находящуюся между струнами и корпусом скрипки (**рис. 9.2.11**). Внутри корпуса, под подставкой, со стороны четвертой струны (g, соль) вдоль верхней деки установлена так называемая пружина — деревянная планка, укрепляющая дека и усиливающая ее резонансные свойства. Под подставкой со стороны первой струны (e2, ми) внутри корпуса вставлена душка — деревянная распорка, соединяющая деки.

Когда натянутая над декой струна колеблется, она передает колебания подставке поблизости от душки. Подставка начинает двигаться, передавая колебания пружине и деке. Колебания деки и производят большую часть звука. Часть звука исходит непосредственно от наружной поверхности деки, остальной звук поступает от внутренней поверхности, проходя через изогнутые отверстия в корпусе — эфы.

Любая скрипка издает звук, однако некоторые инструменты проявляют собственный резонанс, что усложняет задачу скрипача. Если корпус скрипки по-разному реагирует на звуки разной частоты, скрипач должен компенсировать это, выбирая громкость для каждого звука. Поэтому для того, чтобы самая обычная скрипка зазвучала по-настоящему хорошо, нужен великий скрипач. Однако выдающаяся скрипка, как те прославленные инструменты, которые строили в начале XVIII века Антонио Страдивари (1644–1737) и его коллеги в итальянской Кремоне (**рис. 9.2.12**), упрощают задачу скрипача, отзываясь с равным блеском во всем диапазоне инструмента.

**Рис. 9.2.12.** Хотя эта скрипка создана 300 лет назад Антонио Страдивари для испанского королевского двора, она выглядит так же, как современный инструмент. Страдивари и его коллеги из итальянского города Кремона разработали настолько совершенную конструкцию, что с тех пор в нее было внесено лишь несколько незначительных усовершенствований.



Органной трубе не нужно производить звук, потому что этот звук уже существует. Колеблющийся в трубе столб воздуха фактически является стоячей звуковой волной, которая постепенно выходит из трубы, превращаясь в бегущую. Томившийся в ловушке звук вырывается на свободу.

В превращении стоячей волны в бегущую нет ничего удивительного: эти два типа волн тесно взаимосвязаны. Стоячую волну в трубе можно представить как отраженную бегущую волну, которая мечется взад-вперед между двумя концами трубы. Из-за отражения бегущая волна накладывается на свою копию, движущуюся навстречу, и сумма двух равных, но противоположно направленных бегущих волн и есть стоячая волна!

А вот тот факт, что звук отражается от открытого конца трубы, достоин удивления. Если бы конец был закрыт, отражения следовало бы ожидать. В конце концов, мы знаем, что звук эхом отражается от скал и других твердых поверхностей. Но звук частично отражается и от большого числа переходов, включая переход от внутренней части трубы наружу. Если не верите, хлопните в ладоши внутри длинной трубы и послушайте эхо.

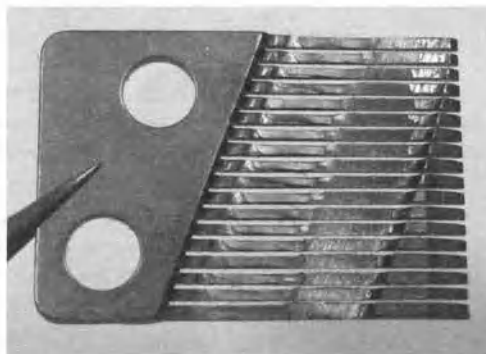
Однако отражение от открытого конца трубы происходит не полностью, поэтому заключенная в трубу звуковая волна постепенно выходит наружу и становится звуком, который мы слышим. Процесс медленного преобразования стоячих волн в бегущие характерен для медных и деревянных духовых инструментов. Отражение от открытого конца трубы зависит от ее формы. Изогнутая коленчатая форма, типичная для медных духовых инструментов, уменьшает отражение и облегчает переход от стоячих волн к бегущим. Вот почему духовые инструменты так эффективно производят звук.

## Музыкальные шкатулки

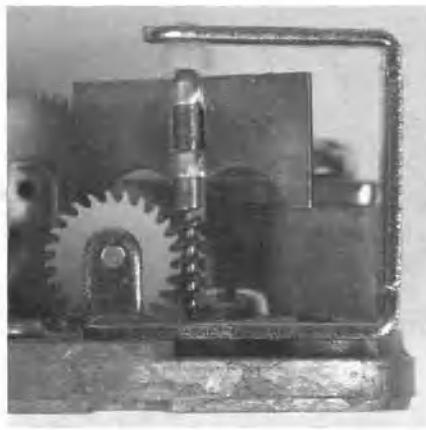
Сердце музыкальной шкатулки (рис. 9.2.13) — гребенка из металлических зубцов. Каждый зубец колеблется с определенной частотой, которая сохраняется даже при затухании громкости. Зубец может поддерживать постоянную частоту, потому что, подобно большинству музыкальных инструментов, представляет собой гармонический осциллятор. Точно так же, как брусок на пружине, зубец ритмично опускается и поднимается с частотой, которая зависит только от его жесткости (упругости) и инерции (массы), а не от амплитуды движения. Упругость зубца



**Рис. 9.2.13.** Гребенка этой музыкальной шкатулки состоит из 18 зубцов, которые колеблются с различной частотой, когда за них зацепляются штырьки вращающегося металлического барабана. Главная пружина (слева вверху) хранит энергию, которая приводит в действие само устройство и крошечный лопастный вентилятор (слева внизу), регулирующий темп, с которым музыкальная шкатулка играет свою мелодию. Резонирующий корпус сейчас снят, поэтому данная шкатулка играет довольно тихо.



**Рис. 9.2.14.** На задней стороне металлической гребенки видно, что концы низкочастотных зубьев толще, чем высокочастотных. Дополнительная масса в основном отвечает за низкие тона, так как увеличение инерции гармонического осциллятора без изменения возвращающей силы уменьшает частоту колебаний осциллятора.



**Рис. 9.2.15.** Вращающиеся лопасти используют сопротивление воздуха, чтобы задать музыкальной шкатулке темп исполнения. Из-за того, что сила сопротивления резко возрастает со скоростью, лопасти вращаются с частотой, достаточной для уравнивания сил, прикладываемых пружиной.

заставляет его вернуться в исходное положение, а инерция вначале препятствует возвращению, а потом заставляет проскочить мимо положения равновесия.

Более короткие зубцы имеют более высокую жесткость и меньшую инерцию, то есть более высокую частоту колебаний. Чтобы избежать большого разброса в длине зубцов, в современных музыкальных шкатулках используют низкочастотные зубцы с утолщенными концами для увеличения их массы без увеличения жесткости. Заднюю сторону гребенки трудно разглядеть, не разбирая шкатулку, но на ней отчетливо видны утолщения (**рис. 9.2.14**).

Штырьки вращающегося металлического цилиндра задевают зубцы и тем самым заставляют их колебаться. Но сам по себе зубец не создает достаточно сильного звука. Зубцы такие узкие, что воздух просто обтекает их, и колебания зубцов почти не влияют на плотность воздуха. Чтобы они могли издавать звук, в полноценной музыкальной шкатулке зубцы связаны со звучащей поверхностью. Так как воздуху не так легко обойти поверхность, она издает звук более эффективно.

Энергия, необходимая для создания звука, запасается в большой спиральной пружине. Пружина заводится ключом и постепенно разворачивается, пока играет мелодия. Чтобы закрутить пружину, вы поворачиваете рукоятку ключа в нужном направлении и тем самым совершаете над ним механическую работу — передаете энергию ключу и далее пружине. Раскручиваясь, пружина совершает работу над зубчатыми колесиками, которые в свою очередь совершают работу над цилиндром и зубцами. Таким образом, ваша энергия превращается в энергию музыкального звука.

Сама по себе пружина, однако, не может регулировать темп музыки. Без дополнительной поддержки она распрямится так быстро, что музыкальная шкатулка “проиграет” всю мелодию в доли секунды. Чтобы продлить воспроизведение и замедлить высвобождение энергии из пружины, музыкальная шкатулка содержит вращающееся устройство с маленькими лопастями, напоминающее вентилятор (**рис. 9.2.15**). Лопасти испытывают сопротивление воздуха, препятствующее вращению.

Здесь особенно важно то, что сопротивление воздуха зависит от скорости вращения — чем быстрее вращаются лопасти, тем большее сопротивление они испытывают. Но скорость вращения возрастает только до тех пор, пока сила от пружины, заставляющая лопасти вращаться, не становится равной противоположно направленной силе сопротивления воздуха. С этого момента лопасти и музыкальный цилиндр равномерно вращаются, пока в пружине не иссякает запас энергии.



## 9.3 Море

Море никогда не бывает неподвижным. Если вы хоть раз побывали на побережье моря, то, вероятно, обратили внимание на два самых важных вида движения: приливы-отливы и поверхностные волны. В этом разделе мы рассмотрим циклы приливов и отливов и движение поверхностных волн по воде. Морские волны помогут нам понять другие волновые явления, включая электромагнитные волны, дающие нам свет, и волны плотности — основу звука.

### Приливы и отливы

Если вы понаблюдаете за морем в течение нескольких дней, то обязательно заметите приливы и отливы. В циклах, таких же древних, как сам океан, уровень воды поднимается в течение примерно шести часов, доходит до высшей точки, затем в течение тех же шести часов опускается до нижней и вновь начинает подниматься. То, что когда-то казалось непостижимой тайной, мы сегодня легко можем объяснить вращением Земли, притяжением Луны и, в меньшей степени, Солнца.

На суше притяжение Луны ощущается настолько слабо, что обычно мы его вообще не замечаем. Луна находится далеко, а притяжение, как мы узнали в разделе 4.2, уменьшается с расстоянием. Но эта зависимость от расстояния также означает, что притяжение Луны разное на разных сторонах Земли; оно сильнее, когда вы находитесь на стороне Земли, обращенной к Луне, и слабее, когда вы находитесь на противоположной, удаленной от Луны стороне (рис. 9.3.1). Но хотя мы не в состоянии почувствовать эти изменения в притяжении Луны, земные океаны на них реагируют. Океаны деформируются под действием силы притяжения Луны (рис. 9.3.2), и это проявляется в возникновении приливов и отливов.

Неодинаковое притяжение Луны на определенных участках на Земле и его достаточно высокое среднее значение для Земли в целом являются причиной образования приливных сил — остаточных сил притяжения, которые направлены на смещение этих участков относительно всей Земли. Обращенная к Луне сторона Земли притягивается к ней с силой, превосходящей среднюю, так что эта сторона испытывает приливную силу, направленную к Луне. Сила притяжения, действующая на обратную сторону Земли, меньше средней, поэтому обратная сторона испытывает приливные силы, направленные от Луны.

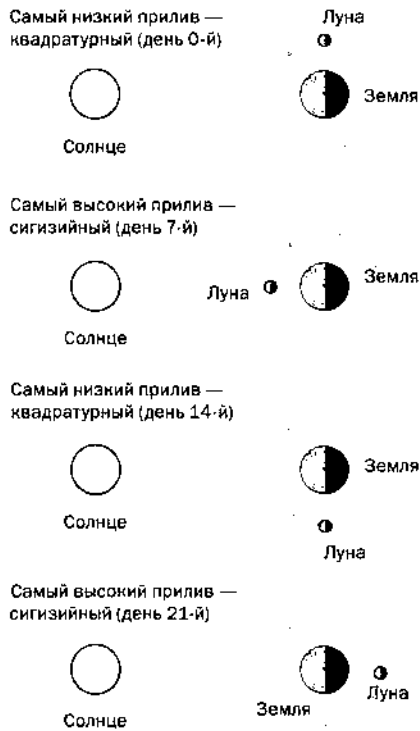
Если бы Земля была не такой жесткой, эти приливные силы придали бы ей форму яйца. На обращенной к Луне стороне Земли возникла бы выпуклость в сторону Луны, но и на противоположной ее стороне должна была бы появиться выпуклость в сторону от Луны. Тогда как сама Земля является слишком жесткой, чтобы заметно деформироваться, океаны не обладают такой жесткостью, поэтому они в ответ на приливные силы действительно образуют выпуклости. Возникают два приливных горба: один в самой близкой к Луне и один в самой удаленной от Луны точках (рис. 9.3.2). На более близкой к Луне стороне выпуклость образуется, потому что вода там пытается придвинуться к Луне быстрее, чем Земля в целом.



**Рис. 9.3.1.** В разных местах Земли сила притяжения Луны разная. Чем ближе к Луне, тем более сильное притяжение испытывает этот участок. Различия в силе притяжения Луны вызывают приливы и отливы.



**Рис. 9.3.2.** Различия в притяжении Луны создают на земной поверхности приливные силы, заставляя океан в двух местах образовывать выпуклости — приливные горбы. Горбы, расположенные в самой близкой и самой удаленной на данный момент от Луны точках, перемещаются в соответствии с вращением Земли.



**Рис. 9.3.3.** В течение лунного месяца высота приливов меняется. Самые сильные приливы наблюдаются, когда Солнце, Земля и Луна находятся на одной прямой. Такие приливы называются сизигийными. Самые слабые приливы — квадратурные — наблюдаются, когда приливные силы Луны и Солнца действуют под прямым углом друг к другу.

На противоположной — наоборот, выпуклость образуется, потому что вода там движется в сторону Луны медленнее, чем Земля в целом. На берегу, расположенном в районе приливных горбов, начинается прилив, а на том, что расположен между горбами, — отлив.

По мере вращения Земли местоположение обоих приливных горбов смещается на запад. Поскольку каждый участок береговой линии испытывает прилив, когда он ближе всего к Луне, а отлив — когда он дальше всего от Луны, полный цикл от прилива до отлива и снова до прилива составляет примерно 12 часов и 24,4 минуты. Эти дополнительные минуты объясняются тем, что Луна, в свою очередь, тоже не стоит на месте; она вращается вокруг Земли, и новолуние повторяется каждые 29,53 суток (см. с. 132). Таким образом, Луна появляется на небосводе каждые 24 часа и 48,8 минуты, а не точно каждые 24 часа.

Но Луна — не единственная причина формирования приливных сил в мировом океане. Хотя Солнце находится гораздо дальше от Земли, чем Луна, его масса настолько велика, что возникающие благодаря его притяжению приливные силы лишь примерно в два раза меньше, чем приливные силы Луны. Проявляются эти силы главным образом тем, что усиливают или ослабляют приливы и отливы, вызванные Луной (рис. 9.3.3). Когда Земля, Солнце и Луна находятся на одной прямой, их приливные силы складываются и вызывают особенно высокие приливные горбы. Когда же Луна по отношению к линии, соединяющей Землю и Солнце, находится под прямым углом, приливные силы Луны и Солнца частично компенсируют друг друга, в результате чего возникают самые низкие приливные горбы.

В течение каждого лунного месяца (время, за которое Луна совершает полный оборот вокруг Земли) два раза возникают особенно сильные приливы. Это происходит, когда все три небесных тела — Солнце, Земля и Луна — выстраиваются в одну линию, то есть в новолуние и полнолуние. С другой стороны, точно так же два раза в месяц приливы бывают и самыми слабыми. Такое случается, когда Солнце и Луна находятся под прямым углом, иными словами, когда фаза Луны находится в первой и последней четверти.

Из-за взаимодействия лунных и солнечных приливных сил параметры цикла приливов слегка колеблются в зависимости от конкретной даты. В то время как в среднем этот цикл составляет 12 часов и 24,4 минуты, в течение лунного месяца он изменяется. Более того, точное время прилива или отлива в каждом конкретном месте зависит еще и от инерции воды, вращения Земли и особенностей окружающей среды, то есть от того, какие препятствия должна преодолеть вода, чтобы сформировать приливной горб. Вот почему в портах и прибрежных зонах обычно публикуют расписание приливов и отливов.

## Резонанс приливов и отливов

Высота прилива зависит от географического положения, но в среднем разница уровней воды между приливом и отливом составляет один-два метра. Поскольку приливные горбы формируются в районе экватора, то чем дальше к северу или к югу от него, тем меньше прилив; приливы в изолированных озерах и морях меньше, чем на побережье океана, потому что дополнительная вода, необходимая, чтобы образовать приливной горб, не может попасть в эти водоемы извне. Однако на Земле существует несколько мест, где приливы просто колоссальны, — например, залив Фанди, обширный эстуарий между канадскими провинциями Нью-Брансуик и Новая Шотландия, где высота прилива может достигать 15 метров. Как же образуются такие высокие приливы?

Приливы подобной высоты — это результат резонанса в каналах и устьях рек. Подобно тому, как серия тщательно рассчитанных по времени толчков органичного насоса может вызвать сильные колебания воздуха в трубе инструмента, так и воду в канале или устье можно заставить сильно колебаться с помощью строго повторяющихся во времени приливов.

Вода в канале представляет собой еще один пример протяженного объекта, пребывавшего в состоянии устойчивого равновесия и начавшего после возмущения колебаться относительно этого положения равновесия. Гигантские приливы возникают благодаря резонансному переносу энергии, когда повторяющиеся циклы приливов и отливов постепенно увеличивают амплитуду подходящей стоячей волны в канале.

В то время как стоячие волны в трубе органа возникают одновременно на всем протяжении воздушного столба, стоячая волна в канале затрагивает главным образом открытую поверхность воды. Когда вода находится в равновесии, ее поверхность гладкая и горизонтальная, но всякий раз, когда поверхность подвергается возмущающему воздействию, то подобно тому, как это происходит с пружинами, возникают возвращающие силы. В случае волн, которые мы рассматриваем в этом разделе, возвращающие силы возникают из-за гравитации, и поэтому эти волны так и называются — гравитационные. С другой стороны, мини-волны, которые мы можем создать в стакане воды, обязаны своим возникновением в основном упругой подвижной поверхности жидкости. Волны, которые в большей степени связаны с поверхностным натяжением, называются капиллярными.

Стоячие гравитационные волны можно наблюдать на поверхности воды в бассейне или даже в большой ванне. Если вы начнете ритмично взад-вперед толкать воду рукой, на поверхности образуются волны. И если вы рассчитаете ритм своих толчков таким образом, чтобы они совпали с естественным ритмом определенной стоячей волны, амплитуда волны увеличится за счет резонансного переноса энергии. Неисчислимое множество детей заново открыли для себя этот феномен, плескаясь в ванне, — к неудовольствию родителей и соседей, которым потом приходилось ремонтировать протекшие перекрытия и испорченные потолки.

Как и стоячие волны, создаваемые скрипичной струной или барабанной мембраной, стоячие поверхностные волны, образующиеся на воде, являются поперечными — то есть вертикальные колебания поверхности воды перпендикулярны к самой горизонтальной волне. В бассейне основной колебательный режим (рис. 9.3.4) характеризуется узлом посередине бассейна и пучностями на обоих краях. В одной пучности вода изгибается вверх и образует гребень — максимальное смещение вверх от равновесия. На другой стороне вода изгибается вниз к самой низкой точке максимального смещения вниз от равновесия. Эту точку называют по-разному — ложбиной, долиной, впадиной и даже подошвой волны. С течением времени гребень опадает, чтобы стать впадиной, в то время как впадина растет и превращается в гребень. Затем процесс идет в обратную сторону, и все повторяется снова и снова, пока плещущаяся вода не превратит всю свою колебательную энергию в тепловую или не передаст ее куда-нибудь еще.

Гигантские приливы в устьях рек и в каналах представляют собой просто пучности стоячей волны, которая колеблется вверх-вниз от гребня до подошвы и обратно. В то время как периоды колебания стоячих волн в обычной ванне длятся секунды и даже меньше, в крупных водоемах могут возникать стоячие волны (известные как сейши) с периодами колебаний, которые измеряются минутами или даже часами.

Вода в заливе Фанди имеет нормальную моду сейши (то есть колебания уровня воды) с периодом примерно 13,3 часа. Так как этот период близок к 12,5-часовому периоду приливов, происходит резонансный перенос энергии от Луны к колеблющейся в устье воде. Прилив двигает воду в устье вперед и назад, пока после множества циклов вода не начинает двигаться так интенсивно, что ее уровень очень сильно колеблется в зависимости от времени.

## Бегущие волны на поверхности воды

В ясный безоблачный день, сидя на пляже и наслаждаясь ровным теплым бризом, вы не можете не заметить, что раскинувшееся перед вами море покрыто зыбью — маленькими гребешками волн. Они упорно движутся к земле и, достигнув ее, разбиваются о берег. Обычно каждый холмик зыби принято считать отдельной волной, но мы рассмотрим всю движущуюся систему равномерно расположенных гребешков как одну волну — бегущую поверхностную волну на воде.

Бегущая поверхностная волна является основной моделью осциллятора в открытом море, простейшей волной на этом фактически бесконечном пространстве. Несмотря на равномерное движение по воде, эти бегущие волны включают и колебания. Колебания можно заметить, если следить за определенной точкой на поверхности воды. Эта точка колеблется вверх и вниз по мере того, как через нее проходят гребни и впадины. Периодом колебания является время полного цикла подъема и спуска, а частотой — количество гребней, проходящих через данную точку за одну секунду.

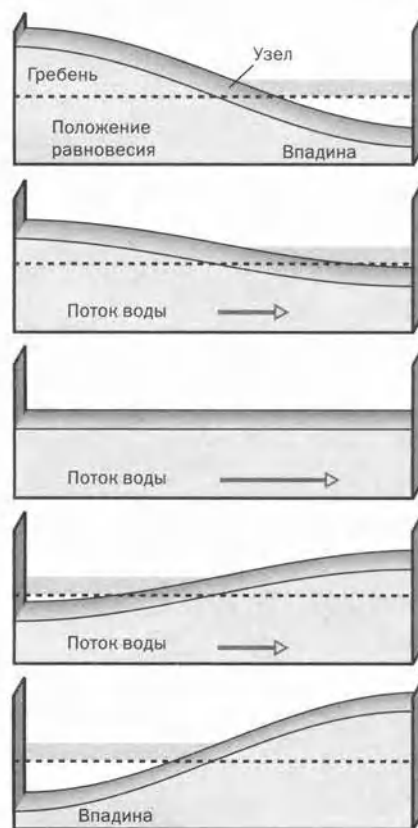


Рис. 9.3.4. В бассейне вода плещется в основной колебательной моде. Ее поверхность поднимается и опускается, гребни становятся впадинами и наоборот, раз за разом.

На поверхности океана существует невероятное разнообразие бегущих волн, каждая из которых движется в своем направлении с собственным периодом и частотой. Более того, эти основные волны могут сосуществовать, накладываясь друг на друга и создавая все более сложные системы. Как и основные цвета, которые при смешивании в соответствующих пропорциях могут производить любые возможные оттенки, бегущие волны “смешиваются”, порождая бесконечно разнообразный рисунок поверхности или волны. Когда океан волнуется, его поверхность представляет собой слоеный пирог из ряби, барашков и широких валов, так что вы можете любоваться наложением “первичных” бегущих волн во всей их красе и разнообразии.

В противоположность этому, основным видом колебаний в каналах и озерах являются стоячие поверхностные волны — простейшая разновидность волн на ограниченной поверхности. В стоячей волне водная поверхность колеблется вертикально вверх-вниз, гребни и впадины периодически меняются местами: гребень становится впадиной, а впадина — гребнем. В стоячей волне орнамент из гребней и впадин никуда не движется; они просто меняются местами с определенной частотой, оставаясь на месте.

Но и на своем ограниченном пространстве эти стоячие волны могут накладываться с образованием любых возможных комбинаций. В этом смысле они аналогичны основным цветам. Итак, бегущие волны представляют собой исходную палитру волн для безграничного океана, а стоячие волны — для ограниченного канала или озера.

---

### **Стоячие и бегущие волны**

Стоячие волны являются основными для протяженных систем с ограниченными размерами. Отличающиеся периодами колебаний и/или видом, эти волны могут накладываться друг на друга с образованием любых возможных волн для данной ограниченной системы.

---

Собственно говоря, мы уже сталкивались с такими выводами, когда речь шла о звуке и музыкальных инструментах. Инструменты представляют собой ограниченные тела, поэтому основным видом колебаний для них являются стоячие волны — основной тон и обертоны. А поскольку атмосферный воздух можно считать практически безграничным, основным видом колебаний в нем являются бегущие звуковые волны. Тембр инструмента отражает наложение многих стоячих волн, а полное звучание оркестра — наложение множества звуковых волн.

И стоячие, и бегущие поверхностные водяные волны несут энергию, которую обычно получают от ветра, приливов, а иногда от сейсмических проявлений. Энергия каждой волны складывается из кинетической энергии движущейся воды и гравитационной потенциальной энергии воды, смещенной со своего равновесного уровня.

В стоячей волне энергия всей волны переходит то в кинетическую, то в потенциальную; кинетическая энергия волны достигает максимума, когда поверхность проходит через свой равновесный уровень, потенциальная — когда поверхность останавливается в точке максимального смещения от положения равновесия, чтобы начать возвращение в противоположную сторону.

Гребни и впадины бегущих волн находятся в постоянном движении, следовательно, вода никогда не бывает горизонтальной или неподвижной. Поэтому в бегущей волне энергия всегда складывается из равных долей кинетической и потенциальной энергий. А так как ее движение направлено, бегущая волна несет момент, направленный в том же направлении, что и скорость волны.

---

### **Структура водяной волны**

Как мы уже знаем, бегущие поверхностные волны в открытом океане движутся с определенной скоростью, длиной волны и частотой. Но что происходит собственно с водой при прохождении волны?

Найти ответ на этот вопрос можно, наблюдая за плавающей на поверхности воды бутылкой (рис. 9.3.5). При прохождении волны бутылка поднимается и опускается вместе с гребнем и впадиной, но в итоге не перемещается ни в каком направлении. Вместо этого бутылка описывает круги. Как и бутылка, сама вода тоже





**Рис. 9.3.5.** Наблюдая за плавающей бутылкой, вы можете убедиться, что вода не движется. Между двумя прохождениями гребней бутылка описывает круг. Начав с гребня (а), бутылка движется вниз и вправо (б), вниз и влево (в), вверх и влево (г) и, наконец, вверх и вправо (д). Она возвращается на то же самое место, как раз когда подходит следующий гребень.

не перемещается вместе с проходящей волной. И хотя вода поднимается, чтобы сформировать гребень, и опускается, чтобы образовать впадину, после того как волна прошла, каждая порция воды возвращается на прежнее место.

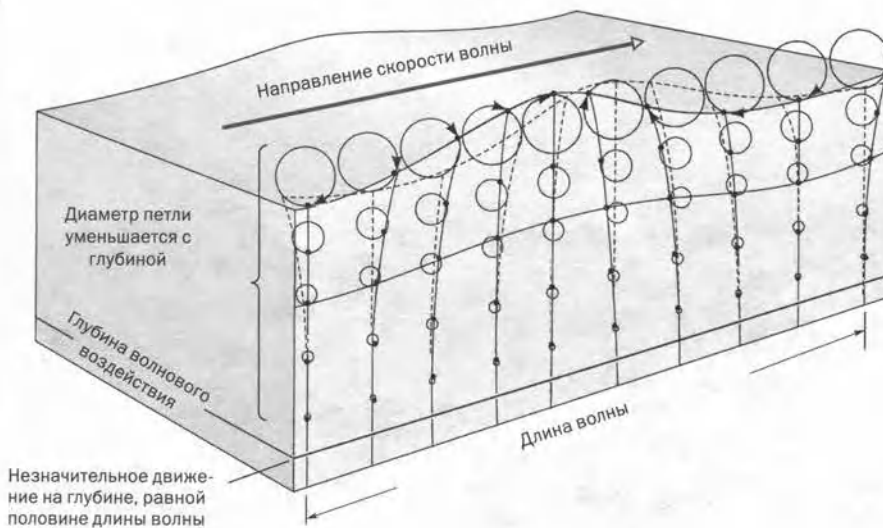
Как и бутылка на **рис. 9.3.5**, участок воды на поверхности океана при прохождении бегущей волны движется по кругу (**рис. 9.3.6**). Вода, начавшая цикл на гребне волны, опускается вниз и вперед, когда гребень уходит. При приближении впадины эта вода движется вниз и назад, затем вверх и назад, когда впадина уходит, и, наконец, вверх и вперед, когда подходит следующий гребень. Попав на вершину очередного гребня, вода оказывается точно на том же месте, с которого она начала цикл. Движение по кругу идет в ту же сторону, куда направлена скорость волны, то есть определяется направлением ее движения. Вода на вершине гребня всегда движется в том же направлении, что и волна в целом.

Однако движется не только вода на поверхности; вода под поверхностью тоже описывает круги. Однако радиус этих окружностей постепенно уменьшается с глубиной. На глубине, примерно равной половине длины волны, радиус становится так мал, что им можно пренебречь. Поэтому, несмотря на то, что такая волна называется поверхностной, у нее есть глубина и, как мы скоро увидим, чувствительность к мелководью.

У этих поверхностных волн есть еще одно интересное свойство: скорость волн тем выше, чем больше ее длина. Может быть, вы замечали, что длинноволновые валы движутся быстрее, чем коротковолновая рябь. Этим они в корне отличаются от звуковых волн, скорость которых всегда одинакова и не зависит от длины волны.

Зависимость скорости волны от ее длины получила название дисперсии, или рассеяния. В данном случае дисперсия имеет место, потому что водная поверхность, несущая длинные волны, на удивление упруга.

В отличие от натянутой струны, которая откликается на коротковолновые возмущения с гораздо более высокой жесткостью, чем на длинноволновые, поверхность воды использует свою массу для сопротивления длинноволновым возмущениям почти так же энергично, как и для коротких волн. Таким образом, повышенная жесткость длинных волн увеличивает их частоту и, следовательно, увеличивает и скорость волны (см. уравнение 9.2.1).



**Рис. 9.3.6.** При прохождении волны вода на поверхности движется по кругу. Вода, в данный момент находящаяся в каждой из точек, обозначенных темным цветом, будет совершать движение по круговой траектории, изображенной на рисунке. Чем ближе к поверхности, тем больше диаметр кругов. На глубине, примерно равной половине длине волны, размер кругов, по которым движется вода, становится настолько малым, что им можно пренебречь. Направление кругового движения (по часовой стрелке или против нее) определяется направлением движения волны. Волна, изображенная на рисунке, движется вправо.

❶ Волна цунами, прокатившаяся по Индийскому океану 26 декабря 2004 г., была вызвана землетрясением, из-за которого произошел внезапный подъем океанского дна у северного побережья Суматры. Эта длинная бегущая волна двигалась так быстро, что большинство жителей прибрежной зоны и островов Индийского океана не успели получить оповещение о цунами и были застигнуты врасплох. Более того, колоссальные впадины волны обнажили обширные участки морского дна, куда с берега сразу же направились любопытные. Эти люди оказались совершенно беззащитными перед разрушительным гребнем, который шел вслед за впадиной. Погибли и пропали без вести примерно четверть миллиона человек.

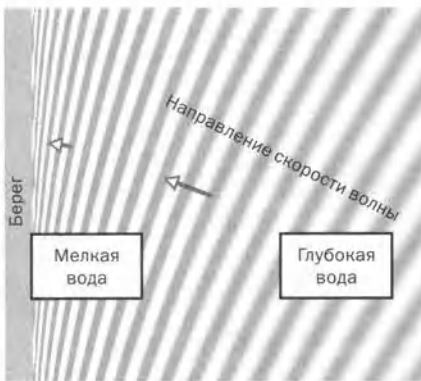


Рис. 9.3.7. Когда бегущая поверхностная водяная волна попадает на мелководье, ее скорость уменьшается, а направление движения меняется. Этот процесс преломления изменяет направление скорости таким образом, чтобы волна шла непосредственно к берегу.

Мелкая рябь имеет меньшую длину волны и движется медленнее, в то время как у больших океанских валов длина волны велика и они движутся быстрее. Гигантские волны, вызванные землетрясениями и извержениями вулканов (цунами), характеризуются огромными длинами волн и могут перемещаться со скоростью сотен километров в час. Из-за того, что эти гигантские волны движутся так быстро и вовлекают в движение воду на большой глубине, они несут колоссальный запас энергии и представляют громадную опасность для прибрежных регионов (подробнее об этом см. ❶).

## Прибрежные волны

Приближаясь к берегу, волна попадает на мелководье. Так как круговое движение воды происходит под поверхностью, наступает момент, когда волна “зацепляется” за дно. Как только глубина воды становится меньше, чем половина длины волны, дно искажает круговое движение воды и оно становится эллиптическим.

У этого изменения есть несколько интересных последствий. Во-первых, скорость волны постепенно уменьшается, и гребни начинают набегать друг на друга. Во-вторых, амплитуда волны — высота ее гребней и глубина впадин — увеличивается по мере того, как волна стремится продолжать движение вперед, несмотря на постоянное снижение скорости. Эти два эффекта объясняют, почему волны, которые в открытом океане выглядят широкими и пологими, вблизи берега становятся крутыми, высокими и по-настоящему опасными. Их гребни соединяются вместе и делаются выше, поэтому крутизна склона между гребнем и впадиной тоже становится выше.

Третьим последствием выхода волны на мелководье является постепенное изменение направления ее движения. Этот феномен, известный как рефракция, или преломление, происходит при любом изменении скорости волны, когда она попадает из одних условий в другие. Поскольку поверхностная волна замедляется при приближении к берегу, она преломляется, то есть поворачивается, чтобы направиться к берегу по возможности под прямым углом (рис. 9.3.7). Благодаря преломлению волны всегда подходят к берегу почти под прямым углом, даже если до этого, в открытом море, они двигались под более острыми углами.

Четвертое и последнее следствие — это разрушение волны, когда она в конце концов разбивается о берег. Волна создает каждый свой гребень из воды, находящейся в данном конкретном месте. Когда гребень доходит до очень мелкого места, волне уже не хватает воды, чтобы сформировать переднюю сторону гребня. Гребень становится неполным и разбивается.

Форма обрушения гребня зависит от уклона морского дна. Если уклон пологий, волна ломается медленно и образует гладкий закругленный “кипящий”



Рис. 9.3.8. Если морское дно имеет пологий уклон, гребень волны разбивается в ровный пенящийся прибой.

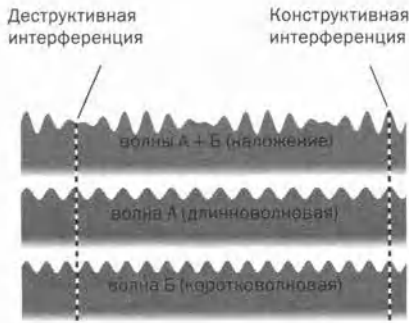
прибой (рис. 9.3.8). Но если уклон дна крутой, волна быстро ломается, когда вершина ее гребня обрушивается на впадину перед ним (рис. 9.3.9). Крутой уклон существенно затрудняет формирование передней стороны гребня. Задняя половина продолжает обычное круговое движение и “накрывает” недостающую часть гребня.

Тем не менее волна может избежать столь печального конца, если ударит в набережную или скалу, а не выкатится на пологий пляж. В этом случае волна не разрушится, а отразится от препятствия и продолжит движение в другом направлении. Это явление, известное как отражение, наблюдается всякий раз, когда определенные динамические свойства волны (в частности, ее скорость) резко меняются при переходе из одних условий в другие. Как ни странно, отражение — общее для волн явление, оно наблюдается не только у морских волн, но также и у световых. При этом феномене поверхностная водяная волна должна измениться так радикально, чтобы вместо того, чтобы разбиться о дамбу или скалу, почти идеально от них отразиться. Но даже не очень значительные изменения окружающих условий могут вызвать хотя бы частичное отражение волн. Таким образом, когда поверхностная водяная волна проходит над песчаной отмелью или коралловым рифом и ее скорость меняется, могут возникать отражение и преломление. Оба явления вносят вклад в сложную динамику прибрежных волн.



**Рис. 9.3.9.** Когда вода становится слишком мелкой, чтобы мог сформироваться полный гребень волны, последняя “разбивается”. Если уклон берега достаточно крутой, со стороны берега гребень будет совсем неполным и обрушится на впадину перед собой.

## Ритм прибоя: интерференция волн



**Рис. 9.3.10.** Две бегущие волны А и Б накладываются друг на друга на поверхности океана и производят интерференционную картину А + Б. Когда эта движущаяся структура достигает берега, чередующиеся по высоте гребни создают биение прибоя.

Если бы океан нес к берегу единственную простую бегущую волну, каждый разбивающийся бурун выглядел и звучал бы одинаково. Тем не менее в грохоте прибоя часто можно различить сложный ритм; его объем меняется с определенной закономерностью, которую называют биением прибоя. Биение прибоя напоминает нам, что поверхность океана — чрезвычайно оживленное место: она одновременно несет несколько разных бегущих волн, и все они вносят свой вклад в это биение.

Чтобы понять, как именно несколько бегущих волн производят биение прибоя, рассмотрим простой пример. Предположим, что две бегущие волны направляются к берегу и что они имеют равные амплитуды, но разные длины волн (**рис. 9.3.10**). Такая ситуация может легко возникнуть, когда ветры над разными частями океана создают две различных бегущих волны, которые затем встречаются. Так как они делят одну и ту же поверхность океана, они накладываются одна на другую.

Поскольку эти две бегущие волны отличаются друг от друга, рисунок их гребней и впадин не может полностью совпадать. Вместо этого волны подвергаются интерференции — в некоторых точках накладывающиеся одна на другую волны усиливают друг друга, в иных точках — уравнивают друг друга. Там, где их гребни или впадины совпадают, происходит конструктивная или усиливающая интерференция — волны объединяются, чтобы создать огромные гребни или впадины. Но там, где гребень одной волны совпадает со впадиной другой волны, имеет место деструктивная, или гасящая, интерференция — волны мешают друг другу, в результате чего образуются сглаженные гребни и впадины либо они вовсе отсутствуют.

В итоге возникает интерференционная картина — сложная структура, которая распространяется в пространстве и времени при наложении волн. Эта интерференционная картина на поверхности океана движется и развивается по мере того, как бегущие волны направляются в сторону берега. Она изменяет свойства гребней, которые в конце концов разбиваются о берег. Так как эти гребни больше не одинаковы по высоте, они образуют сложный ритм биения прибоя. Когда вы наслаждаетесь рокотом прибоя, вы слышите следствие наложения и интерференции волн.

Разумеется, реальный океан несет множество бегущих волн, каждую со своей собственной амплитудой, длиной волны и направлением движения. Но какой бы сложной ни была поверхность океана и каким затейливым ни было бы биение прибоя, вы все равно всего лишь наблюдаете интерференцию волн.

### Наиболее важные волновые явления

**Отражение:** полное или частичное зеркальное перенаправление волны, которое происходит, когда определенные динамические свойства волны, в частности скорость, резко меняются при изменении условий прохождения волны, в том числе из одной среды в другую.

**Преломление:** отклонение волны, которое происходит при изменении ее скорости в связи с изменением условий прохождения волны, в том числе из одной среды в другую.

**Дисперсия:** зависимость скорости распространения волны от ее длины.

**Интерференция:** когда две или более волны накладываются друг на друга, их гребни и впадины могут усиливать (конструктивная интерференция) или гасить (деструктивная интерференция) друг друга с образованием интерференционной картины.

## ГЛАВА 10

# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

---

**Э**лектрический заряд трудно разглядеть, зато его последствия очень заметны. Электричество окружает нас повсюду: это искры и морозные уколы в холодный зимний день, печать изображений на принтере или копировальном аппарате, луч фонарика, возникающий, едва вы нажимаете на кнопку. Хотя мы обычно воспринимаем электричество как нечто само собой разумеющееся, оно лежит в основе нашего сегодняшнего бытия.

Только представьте себе, какой была бы наша жизнь без электрических зарядов и без электричества. Начнем с того, что вечерами мы бы, вероятно, до сих пор сидели вокруг костров, пытаясь придумать, чем бы занять себя в отсутствие телевидения, мобильных телефонов и компьютерных игр. Но прежде чем вы погрузитесь в ностальгию по этим романтическим доэлектронным временам, позвольте мне вернуть вас с небес на землю: нас бы просто не существовало. Идет ли речь о неподвижных зарядах — статическом электричестве или подвижных — электрическом токе, но именно электричество движет нашим миром.

Абстрактная природа электрического заряда и наша неспособность непосредственно ощутить его нашими органами чувств осложняют мою задачу в этой главе. Надеюсь, что ситуации, которые я буду описывать, знакомы вам по собственному опыту и мои объяснения помогут вам понять природу электричества. Я также надеюсь, что вы попробуете понаблюдать и другие эффекты электричества, о которых я упомяну. По правде говоря, я всегда любил электричество, но я не рекомендую всем следовать моему примеру, потому что я выбрал для его познания сугубо практический подход.

Многие из моих детских экспериментов с электричеством увенчались успехом, в первую очередь, конечно, стоит упомянуть изготовление катушки Тесла мощностью 200 000 вольт, которую я смастерил с помощью отца, когда мне было 12 лет. Не скрою, было у меня и немало катастрофических неудач. Помимо почти ежедневных мелких ожогов и подпаленных волос, я еще до окончания школы успел пережить больше ударов током, чем другому хватило бы на всю жизнь. Юношеское безрассудство, знаете ли, и все такое...

В этой главе мы сосредоточимся на электричестве и электрических зарядах, но в следующей, одиннадцатой главе нам предстоит убедиться, что с электричеством теснейшим образом связаны магнетизм и магнитные полюсы. Несмотря на то что в этой главе я не буду касаться этой связи, возможно, вы все равно заметите сходство между этими на первый взгляд различными явлениями.

### 340 10.1 Статическое электричество

*Как электрические заряды действуют на окружающие предметы и почему при этом получают искры.*

### 349 10.2 Копировальные аппараты

*Как можно использовать статическое электричество для копирования документов.*

### 360 10.3 Электрические фонарики

*Как батареи, провода и лампы производят свет.*



## 10.1 Статическое электричество

Действительно, электричество трудно увидеть, но его воздействие трудно не заметить. Как часто, вынимая высушенное белье из барабана стиральной машины, вы обнаруживали носок, прилипший к рубашке? Или пытались оторвать и выбросить, наконец, кусочек полиэтиленовой пленки, который упорно лип к вашим рукам и никак не желал стряхнуться в мусорную корзину?

Силы, стоящие за этими знакомыми явлениями, имеют электрическую природу и ведут свое происхождение от того, что мы обычно называем “статическим электричеством”. Но статическое электричество способно не только перемещать предметы — что вы, наверное, замечали, взявшись за дверную ручку в прохладный сухой день или попытавшись пожать руку другу. В этом разделе мы рассмотрим статическое электричество и физические законы, лежащие в основе его загадочной силы и болезненных уколов.

### Электрический заряд и свежевывстиранная одежда

Вам наверняка приходилось испытать действие статического электричества, если вы только не провели всю жизнь в крайне сыром климате и при этом никогда не носили одежду из синтетических материалов. Самые обычные на вид вещи таинственным образом отталкиваются или притягиваются, в результате чего вас бьет током, когда вы дотрагиваетесь до выключателя, собственного автомобиля или просто чужой руки. Однако статическое электричество — это нечто большее, чем просто досадные мелкие неприятности: это открытое окно, позволяющее взглянуть на внутренний механизм работы нашей Вселенной — а уж такое зрелище достойно самого пристального рассмотрения. Нам понадобится некоторое время, чтобы заложить основы понимания, но вскоре вы сможете объяснить большинство эффектов статического электричества и даже до некоторой степени сможете ими управлять.

О существовании статического электричества известно уже несколько тысяч лет. Примерно в 600 году до н. э. греческий философ Фалес Милетский (ок. 624–546 до н. э.) заметил, что кусочек янтаря, если его энергично потереть клочком меха, притягивает к себе легкие предметы, такие как солому и перья. Янтарь, которые древние греки называли электроном, представляет собой ископаемую окаменевшую древесную смолу, свойства которой аналогичны свойствам некоторых современных пластмасс. Термин “статическое электричество”, как и многие другие в этой главе, происходит от греческих корней.

В основе статического электричества лежит электрический заряд — внутреннее свойство материи. Электрические заряды имеются у многих элементарных частиц, из которых построено вещество, и вместе с ними входят в состав практически любой материи. Никто не знает, зачем и почему существуют заряды; это просто одна из основных характеристик нашей Вселенной — характеристик, которые человек открыл путем наблюдения и эксперимента. Электрический заряд так сильно влияет на содержащие его частицы, что иногда мы даже называем эти частицы электрическими зарядами или просто зарядами.

Электрические заряды оказывают действие друг на друга, и именно силы их взаимодействия вы наблюдаете, когда встречаетесь со статическим электричеством. В следующий раз, разгружая стиральную машину, попробуйте поэкспериментировать с бельем, когда будете вынимать его из сушки. Вы увидите, что некоторые заряженные предметы одежды притягиваются и прилипают друг к другу, а другие, наоборот, отталкиваются. Очевидно, существуют два различных типа заряда.

Собственно говоря, об этом разделении известно уже с 1733 года, когда его открыл французский химик Шарль Франсуа Дюфе (1698–1739), однако имена этим зарядам дал Бенджамин Франклин (см. ❶). Франклин назвал заряд, который появляется на стекле, если потереть его натуральным шелком, “положительным”, а тот, который появляется на палочке из твердого каучука, если ее потереть натуральным мехом, — “отрицательным”. Эти термины мы используем до сих пор.

Два одноименных заряда (оба либо положительные, либо отрицательные) отталкиваются — то есть на каждый действует сила отталкивания, направленная в противоположную от другого заряда сторону вдоль прямой, соединяющей эти заряды (рис. 10.1.1, а, б). Два заряда с противоположными знаками (положительный и отрицательный) сближаются: каждый испытывает силу притяжения, которая тянет его к другому заряду (рис. 10.1.1, в). Эти силы, действующие между неподвижными электрическими зарядами, называются электростатическими.

Когда вы видите, как два свежестырированных носка отталкиваются один от другого, это значит, что оба имеют один и тот же тип заряда. Положительный это заряд или отрицательный, зависит от ткани (подробнее об этом мы поговорим позднее), а пока предположим, что барабан стиральной машины в процессе сушки сообщает обоим носкам отрицательный заряд. Поскольку одноименные заряды отталкиваются, носки отодвигаются друг от друга. Но что, собственно говоря, означают слова “стиральная машина сообщает обоим носкам отрицательный заряд”?

Ответ на этот вопрос состоит из нескольких частей. Во-первых, машина не создает отрицательный заряд, который она сообщает носкам. Подобно импульсу, моменту импульса и энергии, электрический заряд является сохраняющейся физической величиной — он не может быть создан или уничтожен, его можно только передать. Отрицательный заряд, который носок получил в барабане машины, должен был откуда-то взяться — например, от рубашки.

Во-вторых, положительный и отрицательный заряды не представляют собой отдельные величины: это просто положительное и отрицательное количество одной и той же физической величины — электрического заряда. Заряды со знаком плюс имеют положительное количество электрического заряда, а со знаком минус — отрицательное. Как и большинство физических величин, электрические заряды измеряются в условных стандартных единицах. В системе СИ единицей электрического заряда является кулон (обозначается Кл или С). Мелкие предметы редко могут обладать зарядом в целый кулон; заряд вашего носка составляет всего около  $-0,0000001$  Кл.

В-третьих, когда мы говорим об отрицательном заряде, мы имеем в виду носок в целом, а не его составляющие. Как и любое другое обычное вещество, вещество носка содержит огромное количество как положительно, так и отрицательно заряженных частиц. Каждый из составляющих носок атомов состоит из плотного центрального ядра, содержащего положительно заряженные протоны и незаряженные нейтроны, а также окружающей ядро рассеянной оболочки из отрицательно заряженных электронов. Электростатические силы между этими мельчайшими заряженными частицами удерживают вместе не только атомы, но и весь носок. Тем не менее, обеспечивая носку отрицательный заряд, стиральная машина сделала так, что суммарный электрический заряд — сумма всех положитель-

❶ Американский государственный деятель и философ Бенджамин Франклин (1706–1790) прославился не только как политик, но и как выдающийся ученый. Эксперименты, которые он проводил в североамериканских колониях и в Европе, внесли огромный вклад в понимание природы электричества и электрических зарядов. Франклин не только показал, что молния представляет форму электрического разряда, но и изобрел целый ряд полезных устройств, в числе которых печь Франклина, громоотвод и бифокальные очки.

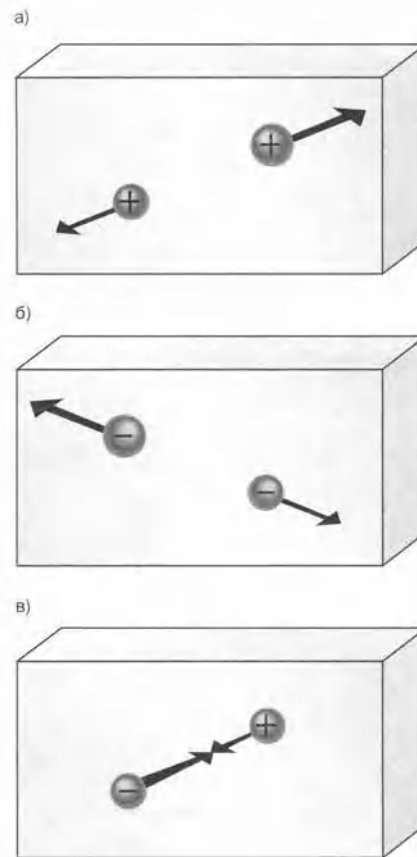


Рис. 10.1.1. (а) На два положительных заряда действуют равные, но направленные в прямо противоположные стороны силы; (б) такой же эффект наблюдается для двух отрицательных зарядов; (в) на два заряда с противоположными знаками действуют равные, направленные точно друг к другу силы.

ных и отрицательных зарядов — оказался отрицательным. Будучи отрицательно заряженным, носок ведет себя так же, как единое отрицательно заряженное тело.

И, наконец, носок становится отрицательно заряженным, когда в нем содержится больше электронов, чем протонов. Чтобы это простое, на первый взгляд, утверждение стало возможным, была проделана огромная и кропотливая научная работа. Прежде всего, эксперименты показали, что электрический заряд дискретен, то есть он всегда равен целому числу элементарных зарядов. Величина элементарного заряда ничтожно мала, она составляет всего около  $1,6 \times 10^{-19}$  Кл — именно такой заряд характерен для большинства элементарных частиц. Электрон имеет заряд  $-1$  — одну элементарную единицу заряда, заряд протона равен  $+1$ , то есть протон тоже имеет одну элементарную единицу заряда. Так как единственные заряженные элементарные частицы обычной материи — это электроны и протоны, носок становится отрицательно заряженным, когда в нем больше электронов, чем протонов.

Возвращаясь к нашему вопросу — что именно сделала стиральная машина, чтобы придать носку отрицательный заряд, — можем сказать, что теперь мы знаем ответ. Предположим, что носок попал в барабан машины, будучи электрически нейтральным — его суммарный заряд был равен нулю. Следовательно, машина должна была добавить носку электронов, или отнять у него протоны, или и то и другое вместе. При передаче зарядов нарушается электрический баланс носка, и он становится отрицательно заряженным.

Помня о законах для сохраняющихся величин, мы будем считать, что все не уточненные упоминания о заряде в этой книге подразумевают положительное количество. Например, говоря, что “стиральная машина передает заряд куртке”, мы подразумеваем, что она передает положительное количество заряда. Точно так же с деньгами: говоря, что “мы отдали деньги на благотворительность”, мы имеем в виду положительное количество денег.

Следует отметить, что терминология зарядов, предложенная Франклином, была блестящей в теории, но не слишком удобной с практической точки зрения. Если расчет суммарного заряда сводится к простым арифметическим действиям, то нужно лишь выбрать, какой заряд назвать “положительным”, а какой — “отрицательным”. К сожалению, выбор Франклина — по-видимому, случайный — привел к тому, что электроны, первичные составляющие электрического тока, считаются заряженными отрицательно.

К тому времени, когда физики осознали ошибку, было уже поздно что-либо исправлять. Ученым и инженерам до сих пор приходится оперировать с отрицательным количеством заряда, который течет по проводу. Представьте себе, как неудобно было бы вести бизнес, используя валюту, имеющую только отрицательные значения!

## Закон Кулона и статическое притяжение

Несмотря на то что на расстоянии в несколько сантиметров ваши носки и рубашка притягиваются друг к другу, вы можете надеть эту рубашку и спокойно отправиться в кино, не опасаясь того, что на вас там вдруг набросится ваш собственный носок. Очевидно, что силы притяжения между зарядами ослабевают с увеличением расстояния.

Около двухсот лет назад французский физик Шарль Огюстен де Кулон (см. ❷) опытным путем установил, что электростатические силы, действующие между двумя электрическими зарядами, обратно пропорциональны квадрату расстояния между ними (рис. 10.1.2). Например, удвоение расстояния между рубашкой и носком уменьшит силу притяжения между ними в четыре раза. Именно благодаря этому вы можете без всяких неприятностей провести вечер в кино.

Эксперименты Кулона также показали, что силы, действующие между зарядами, пропорциональны величине каждого заряда. Это означает, что, увеличив в два раза заряд на носке или рубашке, вы в два раза увеличите силу, с которой каждый из этих предметов одежды воздействует на другой. И наконец, изменение знака заряда превращает силы притяжения в силы отталкивания, и наоборот. Если оба предмета одежды заряжены либо положительно, либо отрицательно, они отталкиваются, а не притягиваются.

❷ В 1781 году, завершив карьеру военного инженера в Вест-Индии, французский физик Шарль Огюстен де Кулон (1736–1806) вернулся в родной Париж с совершенно подорванным здоровьем. В Париже он занялся исследованием природы сил между электрическими зарядами и в 1785–1789 гг. опубликовал серию статей по этому вопросу. Его исследование завершилось в 1789 году, когда он был вынужден покинуть Париж из-за начавшейся Французской революции.



Все эти принципы можно объединить, чтобы описать силу, действующую между двумя зарядами, следующим образом:

$$\text{сила} = \frac{\text{постоянная Кулона} \times \text{заряд}_1 \times \text{заряд}_2}{(\text{расстояние между зарядами})^2} \quad (10.1.1)$$

Сила, действующая на заряд<sub>1</sub>, направлена или к заряду<sub>2</sub>, или от него. Точно так же и сила, действующая на заряд<sub>2</sub>, направлена или к заряду<sub>1</sub>, или в противоположную от него сторону, но в любом случае вдоль прямой, соединяющей эти заряды.

Это соотношение в честь его первооткрывателя назвали законом Кулона. Постоянная Кулона составляет около  $8,988 \times 10^9 \text{ Н}\cdot\text{м}^2/\text{Кл}^2$ . Это одна из фундаментальных природных констант. В соответствии с третьим законом Ньютона, сила, с которой заряд<sub>1</sub> действует на заряд<sub>2</sub>, равна по величине, но противоположна по направлению силе, с которой заряд<sub>2</sub> действует на заряд<sub>1</sub>.

### Закон Кулона

Величина электростатической силы взаимодействия между двумя телами равна постоянной Кулона, умноженной на произведение модулей их электрических зарядов и деленной на квадрат расстояния между ними. Если заряды имеют одинаковый знак, то действуют силы отталкивания. Если заряды противоположны по знаку, то действуют силы притяжения.

Это уравнение, связывающее электростатические силы с расстоянием, не только защищает вас от оставленных дома заряженных носков, но и обосновывает еще одно загадочное свойство выстиранного белья: заряженные тела могут прилипнуть к электрически нейтральным! Например, отрицательно заряженный носок может прилипнуть к нейтральной стене ванной.

Причина этого притяжения кроется в незаметной перестройке зарядов внутри стены. Несмотря на то что стена имеет суммарный нулевой заряд, в ней все равно содержатся и положительно, и отрицательно заряженные частицы. Когда отрицательно заряженный носок находится вблизи стены, он притягивает положительные заряды стены чуть ближе к себе и отталкивает отрицательные заряды стены немного дальше от себя (рис. 10.1.3). Каждый отдельный заряд сдвигается на мельчайшее расстояние, но стена содержит так много зарядов, что вместе они производят заметный эффект. В стене происходит электрическая поляризация — стена в целом остается нейтральной, но ее ближайшая к носку часть приобретает положительный заряд, а удаленная от носка часть — отрицательный.

Положительно заряженная часть стены притягивает носок, в то время как отрицательная его отталкивает. Вы можете подумать, что эти противоположно направленные силы уравновешивают друг друга, но закон Кулона утверждает обратное. Поскольку электростатические силы ослабевают с ростом расстояния, носок сильнее притягивается к близлежащей положительно заряженной части стены, чем отталкивается от более далекой от него отрицательно заряженной части. В результате образуется суммарное притяжение между заряженным носком и поляризованной стеной — и поэтому носок прилипает к стене!

### Перенос заряда: трение скольжения или контакт?

Нам уже понятно, что перенос заряда между предметами одежды осуществляет барабан стиральной машины. Но почему происходит передача заряда и от чего зависит, какой из предметов одежды получит заряд, а какой его потеряет?

Мы могли бы предположить, что за передачу заряда отвечает трение скольжения: предметы одежды в барабане стиральной машины трутся друг о друга, и при этом каким-то образом заряд перемещается из одного предмета в другой. Ведь, казалось бы, именно трение помогает зарядить воздушный шарик, если потереть его о волосы или о шерстяной свитер. Но не торопитесь: есть и другие случаи переноса заряда, которые никак не связаны с трением. Например, полиэтиленовая пленка, которую вы снимаете с упаковки только что купленного товара, может приобрести заряд, как бы вы ни старались ни обо что ее не потереть. И старинный автомобиль в музее может создать достаточный заряд, чтобы вас как следует «дернуло», даже если белая резина его шин никогда не касалась настоящей мостовой.

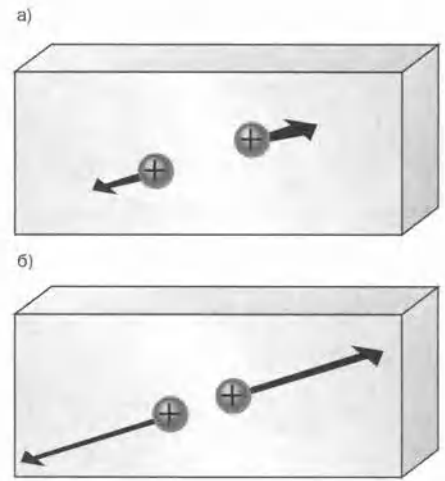


Рис. 10.1.2. При сближении электростатические силы между двумя зарядами резко возрастают. Если расстояние между двумя положительными зарядами уменьшится в 2 раза — от положения (а) к положению (б), — то силы, которые действуют на эти заряды, увеличиваются в 4 раза.

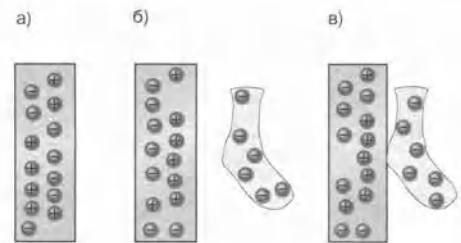


Рис. 10.1.3. (а) Нейтральная стена содержит бесчисленное количество положительных и отрицательных зарядов. (б) По мере того как отрицательно заряженный носок приближается к стене, положительные заряды движутся по направлению к нему, а отрицательные — от него. (в) Поляризованная стена продолжает притягивать носок и удерживать его на месте.

Перенос заряда есть результат не столько трения, сколько контакта между неоднородными поверхностями. Когда два различных материала соприкасаются, какое-то количество электронов, как правило, переходит с одной поверхности на другую. Этот происходит из-за химических различий между материалами и связанных с ними изменений потенциальной энергии электрона, которыми сопровождается переход. В сущности, некоторые поверхности являются “более голодными” по отношению к электронам, чем другие, и при соприкосновении двух неоднородных поверхностей “более голодная” “похищает” некоторое количество электронов у второй, “менее голодной”.

Физика этого “похищения” связана с химической потенциальной энергией — энергией химических связей, которые удерживают вместе атомы и электроны, из которых состоит вещество. Чтобы удержать электроны, поверхность снижает их химическую энергию до отрицательных значений, и, следовательно, чтобы оторвать эти электроны от поверхности, теперь требуется дополнительная энергия. Но некоторые материалы способны уменьшать потенциальную химическую энергию электронов в большей степени, чем другие, и таким образом сильнее связывать свои электроны. Если электрон, находящийся на одной поверхности, может уменьшить свою химическую потенциальную энергию путем перехода на другую поверхность, он перейдет на эту “голодную” поверхность и останется на ней. Вы можете представить это примерно таким образом: электрон словно “перекачивается” из химической “впадины” на одной поверхности в еще более глубокую “впадину” на другой поверхности.

Перенос электронов — это саморегулирующийся процесс. По мере того как электроны накапливаются на поверхности с более низкой энергией, они начинают отталкивать другие электроны, которые пытаются сделать то же самое, и процесс переноса вскоре замедляется. Он окончательно прекращается, когда электроны достигают равновесия, то есть когда действующая на электрон химическая сила, направленная вперед, точно уравновешивается электростатической силой, направленной назад. Перенос не возобновится, пока не соприкоснутся свежие, незаряженные участки поверхности.

И вот здесь на сцену выходит трение. Трение двух поверхностей подразумевает их контакт и предоставляет бесчисленные возможности для переноса заряда между этими поверхностями. Когда белье куврыкается в сушильном барабане, вещи соприкасаются и зачастую трутся одна о другую, при этом некоторые ткани “похищают” электроны и становятся отрицательно заряженными, в то время как другие теряют электроны и приобретают положительный заряд.

Однако мы должны осознавать, что с контактной зарядкой не все так просто. Начнем с того, что соприкасающиеся поверхности не являются химически чистыми и не свободны от микроскопических дефектов. Утверждение, что ткань, которая сильнее удерживает электроны, приобретет суммарный отрицательный заряд, в целом верно, однако загрязнения и дефекты поверхности могут в корне изменить результат. Даже выбор стирального порошка может повлиять на химию поверхности ткани и тем самым на ее заряд. Кроме того, молекулы воды прилипают к большинству поверхностей и влияют на процесс контактной зарядки. Наконец, в то время как мы сосредоточились на обмене электронами, некоторые поверхности, наряду с электронами, способны обмениваться ионами, то есть электрически заряженными атомами, молекулами и другими частицами, и таким образом приобретать суммарный заряд.

## Разделяем одежду: создаем высокую разность потенциалов

Барабан машины останавливается, вы вынимаете из него любимую рубашку и видите, что к ней прилипло несколько носков. Вы начинаете их отдирать, раздается треск, летят искры. Понятно, что прилипают друг к другу вещи с противоположным зарядом, но почему при разделении образуются искры?

Чтобы ответить на этот вопрос, давайте рассмотрим, что происходит с энергией, когда вы отрываете отрицательно заряженный носок от положительно заряженной рубашки. Поскольку, если вы отпустите носок, его опять притянет к рубашке, очевидно, что вы прикладываете к носку силу. А поскольку эта сила и движение носка имеют одинаковое направление, вы также совершаете работу над носком. Вы передаете ему энергию.

Это энергия электростатических сил — носок и рубашка накапливают электростатическую потенциальную энергию. Электростатическая потенциальная энергия всегда присутствует, когда речь идет о разделении противоположных зарядов или сближении одноименных. Когда отрицательно заряженный носок оказывается на некотором расстоянии от положительно заряженной рубашки, в электростатическую потенциальную энергию вносят вклад и притяжение, и отталкивание: противоположные заряды на двух вещах разделены, одноименные заряды собраны на каждой из вещей.

Полная электростатическая потенциальная энергия рубашки и носка равна работе, которую вы совершаете, чтобы их разделить. Но эта энергия не распределяется равномерно между отдельными зарядами на этих вещах. Некоторые из зарядов в зависимости от расположения обладают большей электростатической потенциальной энергией, чем другие, и поэтому играют большую роль в образовании искр. Чтобы учесть эту разницу, нам нужно как-то охарактеризовать электростатическую потенциальную энергию, доступную для заряда, находящегося в определенном месте. Такой характеристикой является электростатический потенциал — электростатическая потенциальная энергия, которой обладает единственный электрический заряд, находящийся в определенной точке.

Понятие потенциала достаточно трудно объяснить, поскольку мы не можем увидеть заряды или ощутить их энергию. Чтобы вам стало понятнее, давайте используем простую аналогию. В нашем примере роль заряда будет играть вода, в роль потенциала — высота. Представьте себе высокий потенциал как воду, находящуюся на большой высоте. Низкий потенциал — вода, находящаяся на меньшей высоте. Подобно тому как вода всегда течет из более высокой точки в более низкую, заряд также стремится от более высокого потенциала к низкому.

Эта аналогия хорошо работает, потому что и потенциал, и высота позволяют измерить энергию в определенных единицах. Итак, потенциал равен электростатической потенциальной энергии на единицу заряда, в то время как высоту можно определить как гравитационную потенциальную энергию, приходящуюся на единицу веса. Конечно, подобное представление о высоте может показаться странным, но, с другой стороны, и вода на большой высоте, и заряд с высоким потенциалом обладают огромной энергией и могут создать большие проблемы!

В системе СИ единицей энергии является джоуль, а единицей заряда — кулон, поэтому потенциал измеряется в джоулях на кулон, или вольтах (обозначается  $V$ , или  $V$ ). Там, где потенциал, точнее, разность потенциалов положительна, заряд (положительный) при перемещении в бесконечно удаленную точку может высвобождать электростатическую потенциальную энергию. Заряд с положительной разностью потенциалов аналогичен воде, находящейся на высоте, например на вершине холма. Вода, стекая или падая на более низкий уровень (в долину), высвобождает гравитационную потенциальную энергию. В случае если разность потенциалов отрицательна, заряд для перемещения в бесконечно удаленную точку нуждается в энергии. Заряд с отрицательным потенциалом аналогичен воде в долине, которой нужна энергия, чтобы подняться на высоту.

Как видите, аналогия “вода — потенциал” очень удобна. Но, как бы полезна она ни была в данном случае (и далее в этой книге), помните, что подъемы и спуски, которые вы представляете себе, чтобы понять суть потенциала, существуют только в вашем воображении. Ваша одежда совсем не обязательно будет двигаться вверх или вниз при изменении потенциала!

Возвращаясь к одежде, следует отметить, что каждая точка на рубашке или носке обладает собственным потенциалом. Вы можете определить этот потенциал, взяв так называемый пробный заряд — исчезающе малое количество (положительного) заряда — и переместив его из данной точки в бесконечно удаленную точку. Потенциал в данной точке равен электростатической потенциальной энергии, которую пробный заряд высвобождает при перемещении, деленной на величину этого заряда. Если исследуемая точка находится на положительно заряженной рубашке, вы получите большой положительный потенциал — вероятно, несколько тысяч вольт. Если точка расположена на отрицательно заряженном носке, то потенциал будет отрицательным, но сравнимым по величине. Положительный или отрицательный, этот высокий потенциал, как правило, порождает искры.

\* Главное, что требуется для электрического пробоя воздуха, который и проявляется в проскакивании искры, — это достижение порогового значения напряженности электрического поля (о ней будет сказано ниже), необходимой для образования искры. А эта величина уменьшается с удалением от зарядов. В случае с носком и рубашкой важно, что они сделаны из ткани, то есть материала, способного менять свою форму. Разнимая эти два предмета, мы позволяем некоторым их частям оставаться в близком контакте. Именно между этими близкими частями и проскакивают искры. Оттягивая же в сторону удаленные части, мы способствуем такому перераспределению зарядов на одежде, при котором напряженность поля между близкими усиливается. Это и вызывает искры. С жесткими предметами (например, с кусками металла) все иначе: мы можем получить искру между такими предметами, только сблизив их друг с другом, но не удаляя.

Очень скоро мы будем рассматривать физику искр и разрядов, но вы уже понимаете, почему противоположно заряженные вещи искрят, когда вы пытаетесь их разделить: при этом образуется высокая разность потенциалов. Пока носок плотно прилипает к рубашке, там не так много доступной электростатической потенциальной энергии. Но как только вы начинаете разделять их, берегитесь!\*

## Накопление огромных статических зарядов

Мы уже знаем, что соприкосновение двух разнородных материалов вызывает перенос небольшого количества зарядов с одной поверхности на другую и что разделение этих противоположно заряженных поверхностей вызывает рост потенциала и, возможно, появление искр. Но негромкое потрескивание выстиранного белья — ничто по сравнению со вспышкой миниатюрной молнии, которую вы можете ненароком вызвать, пройдясь по ковровому покрытию в сухой зимний день, или выйдя из старинного автомобиля, или запуская статический генератор.

Чтобы получить по-настоящему большую искру, нужно разделить множество зарядов, что обычно требует повторяющихся усилий. Хождение по ковру и является одним из таких повторяющихся процессов. Всякий раз, когда резиновая подошва вашей обуви ступает на акриловое ковровое покрытие, некоторое количество (положительного) заряда переходит с покрытия на обувь. Несмотря на то что процесс переноса очень короткий и самоограничивающийся, на ваших туфлях появляется небольшой избыточный заряд. Отрывая подошву от пола, вы совершаете работу над этим приобретенным зарядом, и потенциал вашей обуви взлетает до высокого положительного значения. Высоковольтный заряд имеет тенденцию переходить из одного места в другое, и заряд с обуви быстро распространяется на остальные части тела. К тому времени, когда ваша нога касается следующего участка ковра, туфли успевают отдать большую часть своего заряда и готовы снова повторить процесс.

Каждый раз при соприкосновении с ковром ваша нога получает некоторый заряд. И каждый раз, когда подошва отрывается от ковра, этот заряд распределяется по всему телу. К тому моменту, когда вы наконец дотрагиваетесь до дверной ручки, вы сплошь покрыты зарядами и обладаете огромным положительным потенциалом.

Когда ваша рука еще только тянется к дверной ручке, она начинает влиять на заряды в ней: имеющиеся в дверной ручке отрицательные заряды притягиваются ближе, а положительные отталкиваются дальше. Вы поляризуете дверную ручку.

Как мы уже убедились на примере свежестырированных носка и рубашки, противоположно заряженные тела, если они находятся близко, но не касаются друг друга, могут обладать большим запасом электростатической потенциальной энергии и в то же время проявлять значительные электростатические силы. В примере с дверной ручкой возникает такая же ситуация.

Чем ближе к дверной ручке ваша рука, тем мощнее становятся электростатические силы — до тех пор, пока, наконец, воздух не выдерживает и между ручкой и рукой не образуется искра. В одно мгновение вся накопленная вами электростатическая потенциальная энергия высвобождается в виде света, тепла и звука. И это еще не считая вашего вскрика!

Хождение по ковровому покрытию очень хорошо способствует формированию заряда, но старинный автомобиль — еще лучше. Каждая точка его стертых резиновых шин при соприкосновении с дорожным покрытием собирает отрицательный заряд и образует высокий отрицательный потенциал, по мере того как удаляется от точки касания с дорогой. Этот заряд переносится на кузов машины, так что уже через несколько секунд движения автомобиль накапливает потенциал, достаточный, чтобы вызвать болезненный шок у любого, кто осмелится до него дотронуться.

Работа сборщиков платы на въезде на платные дороги была когда-то весьма опасной! К счастью, современные шины спроектированы таким образом, что отрицательный заряд благополучно возвращается на дорогу, так что автомобили теперь редко накапливают большой заряд, и большая часть неприятных электрических разрядов сегодня случается в те моменты, когда вы двигаетесь по сиденью, садясь в машину или выходя из нее.

В то время как создатели автомобилей пытаются бороться со статическим электричеством, существуют устройства, в которых отдельные заряды намеренно собирают для создания чрезвычайно высоких потенциалов. Наиболее знаменитое из таких устройств — генератор Ван де Граафа (рис. 10.1.4).

В этом устройстве положительные или отрицательные заряды с помощью резиновой ленты подаются на металлический шар, пока величина накапливающегося на нем потенциала не достигнет сотен тысяч или даже миллионов вольт.

В обычном школьном генераторе Ван де Граафа для переноса отрицательных зарядов от основания к сферической металлической макушке используется резиновая лента, которую приводит в движение электродвигатель. Оказавшись внутри сферы, отрицательные заряды переходят с ленты на внешнюю поверхность сферы, где располагаются как можно дальше друг от друга. В таком состоянии они находятся, пока каким-то образом не происходит их высвобождение.

Шар генератора Ван де Граафа, установленный на вершине высокой изолированной колонны, может накапливать огромный отрицательный заряд. Вы даже можете услышать, как рычит мотор, поднимая отрицательные заряды на ленте в сферу, что показывает, насколько велик образующийся отрицательный потенциал шара. В конце концов шар высвобождает отрицательный заряд в виде гигантской искры-молнии.

Но даже без этого зрелища генератор Ван де Граафа представляет собой интересное устройство. Если вы надежно изолируетесь от земли и дотронетесь до металлической сферы в то время, когда она заряжается, часть отрицательного заряда перейдет на вас. Если у вас длинные волосы, то они могут встать дыбом — результат того, что отрицательные заряды распространились вдоль волос и, будучи зарядами одного знака, начали с силой отталкивать друг друга.

## Управление статическим электричеством: умягчители и кондиционеры для тканей

Теперь, когда мы знаем, что такое статическое электричество и как оно образуется, мы готовы узнать, как с ним управляться. Статическое прилипание, встающие дыбом волосы, удар током при рукопожатии — все это мало кому понравится. Основное решение проблемы статического заряда — подвижность: если заряды могут свободно перемещаться, они сами унесут статическое электричество. Заряды с противоположным знаком притягиваются, поэтому любые разделенные положительные и отрицательные заряды будут стремиться соединиться при первой же возможности. Материалы, которые позволяют свободное перемещение заряда (например, металлы), называются электрическими проводниками. Те же материалы, которые, подобно пластику, волосам и резине, препятствуют свободному перемещению заряда, называются диэлектриками, или изоляторами. Поскольку движение заряда устраняет статическое электричество, то все наши беды, связанные с ним, происходят в основном от диэлектриков. Если бы мы носили металлическое белье, никаких проблем с прилипанием выстиранных предметов не было бы.

Простейший способ уменьшить статический заряд — это превратить диэлектрик в проводник. Даже слабые проводники, которые лишь в незначительной степени проводят заряд, постепенно избавятся от любых скоплений отдельных зарядов. В этом и состоит одна из главных задач умягчителей для ткани, сухих салфеток с антистатиком и кондиционеров для волос. Все они превращают изолирующие материалы — ткани и волосы — в слабые проводники электричества. Результат — почти полное исчезновение статического электричества и всех связанных с ним неудобств.

Как работают эти три разновидности антистатиков — отдельная интересная история. Все они используют сходные вещества — положительно заряженные молекулы того или иного мощного средства. Такая молекула представляет собой длинную цепочку, один конец которой имеет электрический заряд, а другой — электрически нейтрален. Заряженный конец цепочки за счет электростатических сил связывается зарядами противоположного знака и с точки зрения химии чувствует себя в воде как дома... точнее, как рыба. Нейтральный конец цепочки — маслоподобный, скользкий, и “как дома” он чувствует себя в маслах и жирах. Такое “двуличие” делает моющие средства незаменимыми для стирки и чистки.

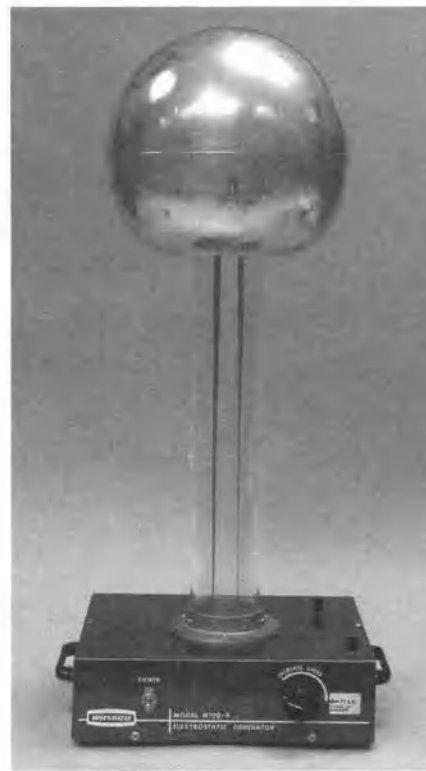


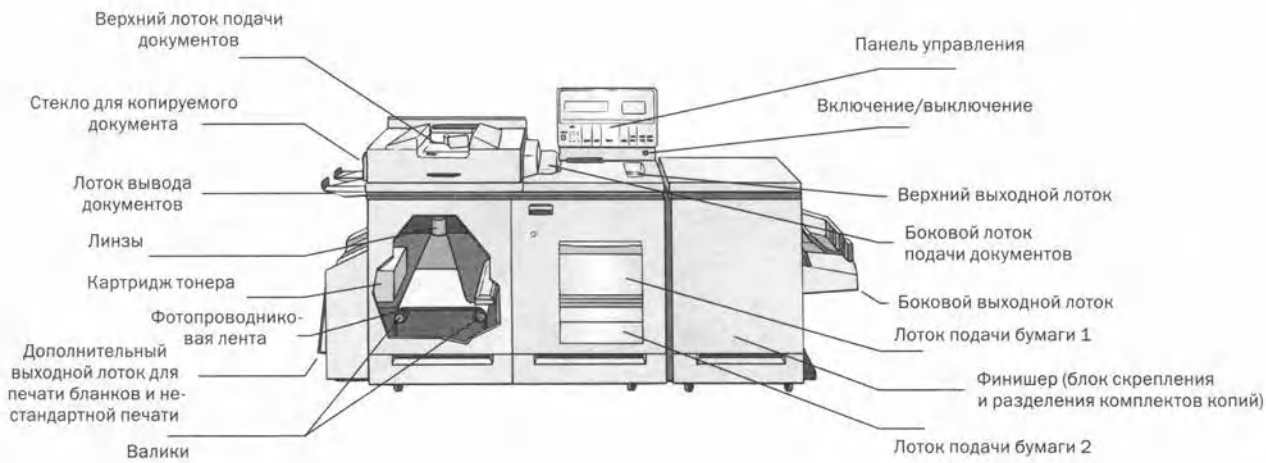
Рис. 10.1.4. Статическое электричество может быть получено с помощью механических процессов. В этом генераторе Ван де Граафа движущаяся резиновая лента переносит отрицательный заряд от основания к блестящей металлической сфере. Отрицательный заряд, возвращаясь по воздуху к оставшемуся внизу положительному заряду и соединяясь с ним, создает очень сильные яркие искры.

Может показаться, что положительно и отрицательно заряженные молекулы моющих средств чистят одинаково хорошо, но это не так. Поскольку чистящие средства не должны прилипать к материалам, которые они очищают, важно, чтобы те и другие не были бы противоположно заряжены. Ткани и волосы во влажном состоянии обычно становятся отрицательно заряженными — еще один пример переноса заряда при соприкосновении двух различных материалов, — поэтому отрицательно заряженные молекулы моющего средства работают гораздо лучше, чем положительно заряженные.

Однако от положительно заряженных моющих средств тоже есть польза, только не следует применять их до тех пор, пока вы не отстираете белье или не отмоете волосы. “Скользкие” молекулы этих средств, благодаря тому, что они так хорошо прилипают к влажным волокнам, долго остаются на волосах или ткани после мытья и придают им мягкость и шелковистость. К тому же они наделяют эти материалы способностью проводить электричество, пусть и в ничтожной степени, что позволяет избавиться от статического электричества!

Электропроводность возникает главным образом благодаря способности моющих средств притягивать влагу. Вода — слабый электропроводник, поэтому увлажнение поверхностей позволяет зарядам перемещаться (по этой причине влажный воздух снижает статическое электричество). Придавая тканям и волосам почти незаметную влажность, положительно заряженные моющие средства дают разделенным зарядам возможность воссоединиться и таким образом решают проблемы электризующихся волос или прилипающего белья. Поэтому они и являются главными компонентами умягчителей белья, антистатических салфеток, кондиционеров для волос, а также многих антистатических аэрозолей.

---



## 10.2 Копировальные аппараты

Время бумаги-копирки давно миновало, и разве можно представить современный офис без копировального аппарата? Рекламу копировальных машин мы видим и слышим везде и всюду, и хотя каждый производитель утверждает, что именно его аппараты — самые лучшие, это чаще всего не более чем рекламный трюк. На самом деле все ксерокопировальные машины основаны на одних и тех же принципах, открытых в 1938 году Честером Карлсоном (см. ❶). В этом разделе мы рассмотрим копировальные аппараты и физические законы, которые позволяют им работать.

### Ксерокопирование: использование света для получения копий

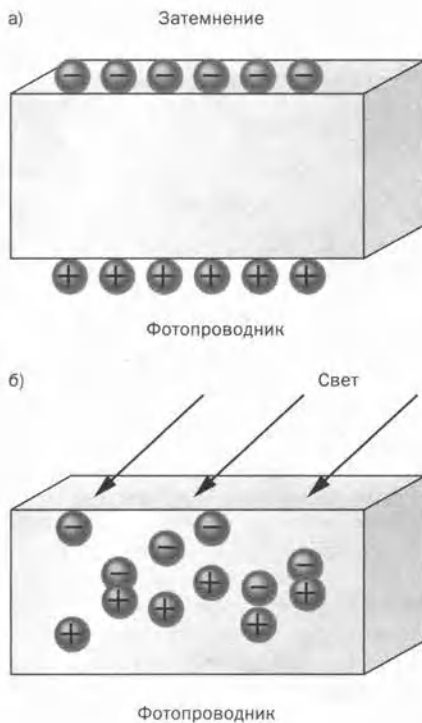
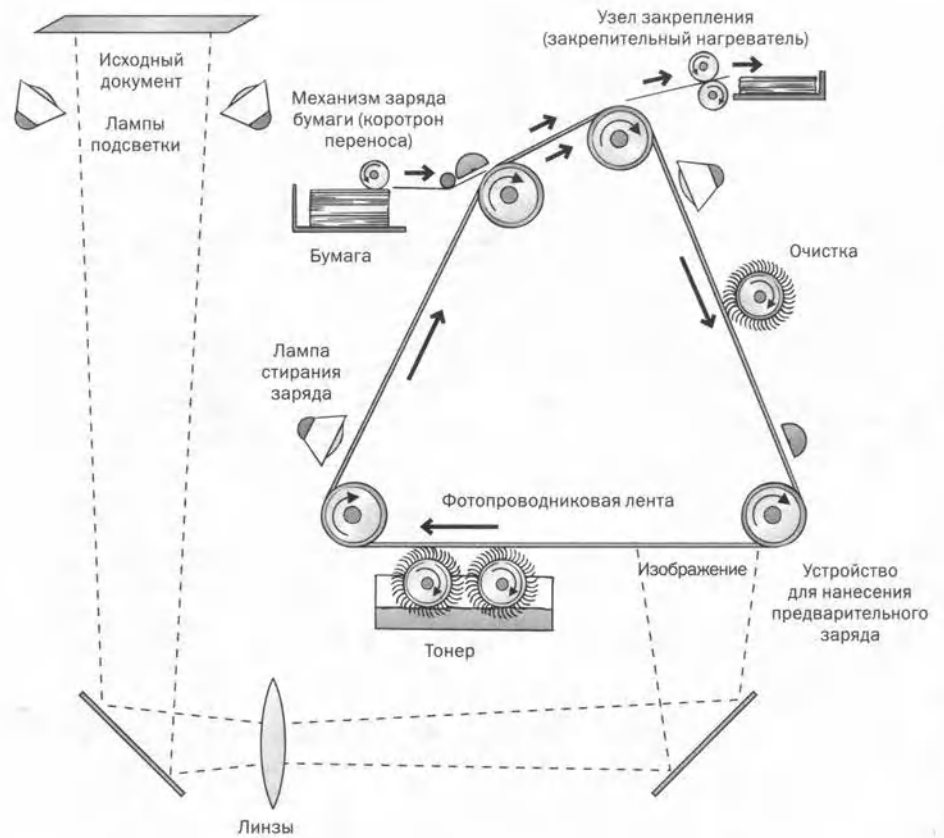
Изображение, которое копировальный аппарат печатает на листе бумаги, рождается в виде рисунка из крошечных частиц черного или цветного порошка (тонера) на гладкой светочувствительной поверхности. Копировальный аппарат использует статическое электричество и свет, отраженный от исходного документа, чтобы соответствующим образом расположить тонер на поверхности, а затем тщательно перенести его на бумагу (рис. 10.2.1). Этот процесс основан на действии нашего старого друга — статического электричества.

Сердце ксерокса — фоторецептор, тонкая светочувствительная поверхность, изготовленная из фотопроводника. В обычных условиях фотопроводник — диэлектрик, но под воздействием света он становится проводником. Затемненный фотопроводник может удерживать положительные и отрицательные заряды на расстоянии друг от друга, но эти заряды быстро сближаются, когда на фотопроводник падает свет (рис. 10.2.2). Такая гибкость позволяет свету, отраженному от исходного документа, сформировать скрытое электростатическое изображение на поверхности фотопроводника и затем соответствующим образом распределить тонер на листе бумаги.

Каждый цикл копирования начинается в темноте с зарядки — равномерного распыления отрицательных зарядов по поверхности фотопроводника. На обратной стороне фотопроводника находится заземленная металлическая поверхность (термин “заземленная” означает, что фоторецептор электрически соединен с землей таким образом, что заряды могут свободно перетекать между ними). Отрицательные заряды, оказываясь на открытой поверхности фотопроводника, притягивают положительные заряды на металлическую поверхность под ним. После окончания процесса распыления зарядов открытая поверхность фотопроводника равномерно покрыта отрицательными зарядами, а подстилающая металлическая поверхность — положительными (рис. 10.2.3, а).

❶ Американский изобретатель Честер Карлсон (1906–1968) родился в бедной семье и в юности помогал родителям, подрабатывая после школы мытьем окон и уборкой офисов. Устроившись помощником в офис какого-то юриста, где приходилось копировать тысячи документов, Карлсон задумался о технологиях копирования и начал экспериментировать с электрофотографией. Ему удалось окончить Калифорнийский технологический институт, и Карлсон поступил на работу в *Bell Laboratories*, однако был уволен во время Великой депрессии. Тем не менее он продолжал эксперименты и в 1937–1938 гг. изобрел процесс ксерокопирования. Внедрение коммерческих копировальных машин шло медленно, и только в 1960 г. корпорация *Xerox* выпустила свой первый успешный аппарат, модель 914. Карлсон стал весьма богатым человеком, но раздал большую часть своего состояния на благотворительность, причем анонимно.

**Рис. 10.2.1.** В этом ксерокопировальном устройстве для получения черно-белого изображения исходного документа используется фотопроводниковая лента. Процесс копирования начинается с зарядки ленты. С помощью оптической системы на плоской части ленты получают электростатическое изображение. После того как к электростатическому изображению прилипают частички тонера, первая лампа стирания заряда удаляет заряд и ослабляет связь между тонером и лентой. Затем тонер переносится на бумагу и закрепляется на ней путем плавления.



**Рис. 10.2.2.** (а) В темноте фотопроводник проявляет свойства диэлектрика, поэтому отдельные электрические заряды на его поверхности остаются на ней на неопределенное время. (б) Под действием света фотопроводник становится проводником, и очень скоро заряды с противоположными знаками сближаются.

После зарядки с помощью системы линз и зеркал копировальный аппарат передает четкое изображение исходного документа на фотопроводящую поверхность. О линзах и формировании изображения мы поговорим в главе 15, когда будем рассматривать фотоаппараты. Пока что нам важно знать, что свет попадает на фоторецептор только в определенных местах, соответствующих белым участкам копируемого документа.

Существует два стандартных метода воздействия света на фоторецептор и, соответственно, два вида фоторецепторов — ленточные и барабанные. Некоторые аппараты освещают весь исходный документ ярким светом мигающей лампы и проецируют полное изображение на плоскую часть ленты фоторецептора. В других разновидностях копировальных машин движущиеся лампы или зеркало освещают документ небольшими порциями, и изображение в виде движущихся узких полос проецируется на вращающийся фотобарабан.

И в том и в другом случае заряды движутся через те участки фоторецептора, которые подвергаются воздействию света, после чего эти участки становятся электрически нейтральными (рис. 10.2.3, б). В результате на поверхности фотопроводника формируется скрытое электростатическое изображение — узор из электрических зарядов, который точно соответствует изображению на исходном документе (рис. 10.2.3, в).

Чтобы «проявить» отпечаток, то есть преобразовать электростатическое изображение в видимое, ксерокс подвергает фотопроводник воздействию положительно заряженных частиц тонера (рис. 10.2.3, г). Тонер представляет собой очень мелкий полимерный порошок, обладающий диэлектрическими свойствами и содержащий красящий пигмент, чаще всего черный.

Тонер должен равномерно распределяться по поверхности фотопроводника очень аккуратно, для чего часто используют железные шарики с тефлоновым покрытием. Эти мельчайшие шарики с помощью вращающегося магнитного вала удерживаются вместе в виде длинных нитей, так что вал напоминает вращающуюся щетку с необычайно мягкой щетиной. Эти щетинки захватывают частицы тонера из резервуара и наносят на фоторецептор. При контакте с тефлоном частицы тонера остаются положительно заряженными, поэтому они прилипают к отрицательно заряженным участкам фоторецептора (рис. 10.2.3, д).



**Рис. 10.2.3.** Вначале фотопроводник покрывается ровным слоем отрицательных зарядов (а). Под действием света (б) часть заряда стирается, и формируется электростатическое изображение (в). Электростатическое изображение притягивает (г) положительно заряженные частицы тонера (д). Электростатическое изображение стирается (е), чтобы освободить частицы тонера (ж). Тонер переносится на отрицательно заряженную бумагу (з) и закрепляется на бумаге с помощью тепла (и).

Теперь на фоторецепторе появилось черно-белое изображение исходного документа, которое нужно перенести на бумагу. Перед переносом копировальный аппарат ослабляет сцепление фотопроводника с тонером, подвергая первый воздействию света от специальной лампы стирания заряда. Этот свет устраняет большую часть заряда фотопроводника (рис. 10.2.3, е), в результате чего приклепление положительно заряженных частиц к его поверхности становится очень слабым (рис. 10.2.3, ж).

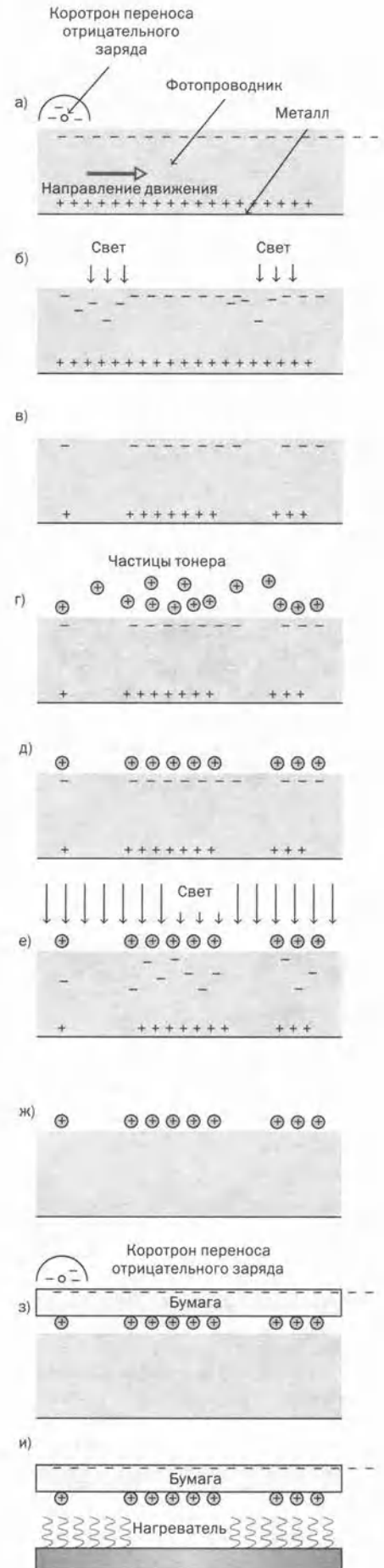
Затем копировальный аппарат переносит порошковое изображение на чистый лист бумаги, и лист слегка прижимается к фотобарабану во время распыления отрицательного заряда на обратной стороне бумаги (рис. 10.2.3, з). Положительно заряженный тонер притягивается к отрицательно заряженной бумаге и они вместе покидают барабан. Затем ксерокс нагревает и под давлением закрепляет копию: тонер плавится и впитывается в бумагу (рис. 10.2.3, и). После переноса изображения на бумагу поверхность фотопроводника очищается, чтобы подготовить его для следующей копии: вторая лампа стирания заряда убирает оставшийся заряд, а удаление остатков тонера производится с помощью специальной чистящей кисти либо резинового чистящего скребка.

После такого введения в ксерографию вы уже можете объяснить кое-какие вещи, касающиеся копировальных аппаратов. Например, пытаясь разобраться, почему не работает “ксерокс” у вас в офисе, вы обнаруживаете, что последние копии не завершены — изображение тонером уже нанесено, но еще не закреплено, и порошок тонера остается у вас на руках, потому что он удерживался на бумаге только электростатическими силами. И когда вы меняете картридж тонера в своем копировальном аппарате, то, помимо новой порции порошка, вы на самом деле также устанавливаете новую систему предварительной зарядки, фотобарабан и устройство для нанесения тонера (рис. 10.2.4).

Заметим, что пока что мы не затронули три важных вопроса из области физики. Два из них мы оставим для последующих глав: почему фотопроводник под воздействием света переходит в проводящее состояние (глава 12, “Электроника”) и как линза проецирует изображение документа на фотопроводник (глава 15, “Оптика”). Но третий вопрос — каким образом копировальный аппарат наносит заряды на поверхность — мы не можем обойти и поэтому рассмотрим его сейчас.



**Рис. 10.2.4.** В этом копировальном аппарате фотобарабан, запас тонера и коротрон переноса размещены внутри сменного картриджа. После прохождения бумаги через картридж тонер закрепляется на ее поверхности, и копия выходит из аппарата.



В начале цикла копирования аппарат равномерно покрывает поверхность фотопроводника электрическими зарядами. Так как этот процесс зарядки происходит в темноте (то есть поверхность фотопроводника представляет собой диэлектрик), заряды приходится распылять по ней, словно краску. В качестве распылителя зарядов используют коронный разряд — слабое устойчивое свечение, которое образуется в воздухе возле острия или тонкого провода, находящихся под высоким напряжением.

Это особая разновидность разряда, прохождение электрического заряда через газ. Воздух в обычном состоянии представляет собой диэлектрик, потому что его атомы и молекулы нейтральны и не могут переносить заряд из одного места в другое. Тем не менее, насыщая воздух отдельными заряженными частицами, копировальному аппарату удастся превратить воздух в проводник, а затем произвести в нем разряд. Но как происходит насыщение воздуха зарядами и как называется разряд? И как разряд помогает покрыть поверхность фотопроводника зарядами? Чтобы ответить на эти вопросы, мы должны больше узнать об электростатических силах и потенциале, а также о непосредственно связанном с ними понятии — электрическом поле.

Поскольку в воздухе трудно найти свободные заряды, копировальный аппарат начинает с нескольких заряженных частиц и использует их для получения множества других. Идея проста: ксерокс с помощью электростатических сил разгоняет исходные заряды до огромных скоростей и позволяет им врезаться в нейтральные частицы воздуха. Если удар достаточно сильный, нейтральная частица воздуха разбивается на два противоположно заряженных фрагмента и, следовательно, в воздухе появляется еще два свободных заряда. Новые заряды тут же включаются в игру, ускоряются, сталкиваются и разбивают еще больше частиц воздуха. В результате лавины столкновений наступает “пробой” воздуха — превращение диэлектрика в проводник. На следующем этапе копировальный аппарат использует этот проводящий воздух для распыления зарядов по поверхности фотопроводника.

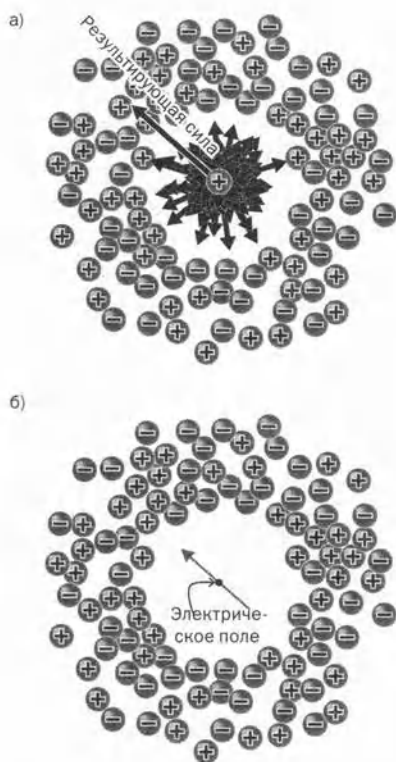
Но откуда берутся эти исходные заряды? Как ни странно, они присутствуют в воздухе изначально — это продукты космического излучения и естественной радиоактивности! В каждом кубическом сантиметре обычного воздуха насчитывается почти 2000 заряженных частиц, примерно поровну положительных и отрицательных. Если учесть, что в этом же объеме воздуха содержится почти  $3 \times 10^{19}$  нейтральных частиц, это вроде бы не так уж много. Однако вполне достаточно, чтобы начать разряд!

Чтобы получить из немногочисленных исходных зарядов нужное количество новых, необходимо очень интенсивно их ускорять. Нейтральные частицы воздуха так плотно упакованы, что зарядам трудно успеть как следует разогнаться, прежде чем они столкнутся с какой-то другой частицей и потеряют скорость. Чтобы у каждого исходного заряда был шанс разбить первую же нейтральную частицу, с которой он столкнется, копировальный аппарат должен очень быстро разогнать этот заряд.

Для этого он использует электростатические силы. До сих пор мы связывали эти силы с парами зарядов: каждый заряд либо притягивал, либо отталкивал другой. Так как отдельные силы, действующие на тело, складываются, чтобы дать результирующую силу, действующую на данное тело, можно легко рассчитать, как повлияют друг на друга три заряда, или четыре, или пять... Но в разряде и проводах ксерокса задействовано такое множество отдельных зарядов, что учесть все силы практически невозможно. Нам нужно как-то иначе охарактеризовать суммарную электростатическую силу, действующую на каждый отдельный заряд.

Вместо того чтобы рассматривать множество взаимодействий между данным зарядом и всеми остальными окружающими зарядами (рис. 10.2.5, а), мы можем представить себе электростатическую силу, действующую на наш заряд, как результат его взаимодействия с чем-то одним — электрическим полем. Электрическое поле — свойство пространства, которое действует на заряд электростатической силой (рис. 10.2.5, б). С этой новой точки зрения мы можем считать, что наш заряд ускоряется, потому что он взаимодействует с локальным электрическим полем, которое создается всеми окружающими электрическими зарядами.

Электрическое поле на первый взгляд кажется всего лишь посредником: окружающие заряды создают его, и это поле действует на наш заряд. Но в следующих



**Рис. 10.2.5** (а) Когда заряд взаимодействует со многими другими зарядами, трудно учесть отдельные электростатические силы, действующие на этот заряд, и рассчитать результирующую силу. (б) Часто гораздо проще в качестве вспомогательного инструмента использовать понятие электрического поля. Это электрическое поле создается другими зарядами, а оно в свою очередь действует электростатической силой на заряд (на рисунке не показан). Стрелка электрического поля, проходящая через точку в центре, показывает величину и направление силы, которая действует на положительный заряд, находящийся в этой точке.

разделах мы увидим, что электрическое поле играет гораздо более значительную роль и что его существование — вовсе не бессмысленная выдумка, как могло бы показаться. Дело в том, что электрическое поле действительно существует в пространстве независимо от создающих его зарядов. На самом деле электрические поля часто создаются вовсе не зарядами и могут влиять не только на заряды.

Электрическое поле копировального аппарата изменяется в зависимости от местоположения, то есть величина электростатической силы, действующей на наш заряд, зависит от того, где именно он находится. Эта сила равна произведению величины заряда на напряженность электрического поля и направлена в ту же сторону, что и поле.

Мы можем записать это отношение следующим образом:

$$\text{сила} = \text{заряд} \times \text{напряженность электрического поля} \quad (10.2.1),$$

где сила направлена в ту же сторону, что и напряженность электрического поля.

Заметим, однако, что на отрицательно заряженную частицу (например, электрон) действует сила, направленная противоположно напряженности электрического поля. В системе СИ единицей напряженности электрического поля является ньютон/кулон (сокращенно Н/Кл, или N/C).

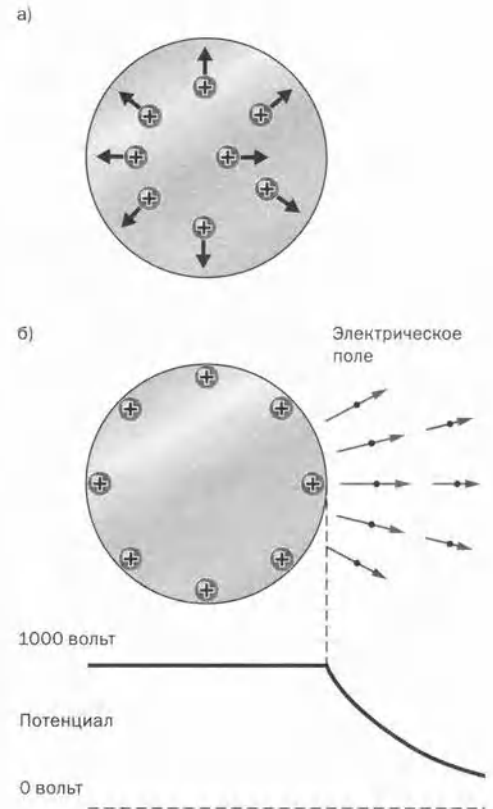
Чтобы добиться “пробоя” воздуха и управлять разрядом, копировальный аппарат использует очень сильное электрическое поле. Это поле так быстро разгоняет заряды, что происходит лавинообразное нарастание количества столкновений и воздух насыщается свободными зарядами. К сожалению, мы не можем непосредственно ощущать электрическое поле, поэтому трудно оценить, что значит “сильное”. Мы еще поработаем над этой задачей, но сейчас просто запомните, что сильные электрические поля могут инициировать разряды в воздухе. Именно так грозы порождают молнии!

## Проводники и градиент потенциала

Система предварительной зарядки копировального аппарата использует слабый коронный разряд, который образуется в сильном электрическом поле в непосредственной близости от тонкого провода (нити коронатора), на которую подается высокий потенциал с помощью высоковольтного блока. Этот разряд переносит заряды на поверхность фотопроводника, где равномерно их распределяет. Но чтобы понять, почему сильное электрическое поле возникает рядом с тонким высоковольтным проводом и почему оно производит слабый разряд, нам нужны еще некоторые сведения. Давайте начнем с рассмотрения электрических полей, возникающих внутри и снаружи электрических проводников.

Возьмем простейшее проводящее тело — твердый металлический шар. Что произойдет, если поместить внутри шара (рис. 10.2.6, а) некоторое количество положительных зарядов? Поскольку одноименные заряды отталкиваются, они будут стремиться наружу, чтобы расположиться на наибольшем расстоянии друг от друга. Они даже покинули бы пределы шара, если бы не были химически связаны с металлом. Потратив некоторое время на то, чтобы избавиться от излишков электростатической потенциальной энергии, главным образом в виде тепла, заряды размещаются на поверхности шара в состоянии устойчивого равновесия (рис. 10.2.6, б). В состоянии равновесия электростатическая сила, действующая на каждый заряд со стороны других зарядов и направленная наружу, в точности уравновешивается внутренней химической силой, действующей со стороны металла и направленной внутрь\*. В итоге результирующая сила, действующая на заряд, равна нулю.

Кроме того, в состоянии равновесия каждый заряд минимизирует свою общую потенциальную энергию. Дело в том, что заряд не может остановиться, пока существует направление, в котором он может двигаться и при этом понижать свою потенциальную энергию. Но что удивительно — оказывается, заряды располагаются на поверхности шара так, что в конечном итоге все они обладают одинаковой потенциальной энергией. Это происходит потому, что если бы у одного из них потенциальная энергия была меньше, чем у остальных, другие заряды устремились бы к нему, чтобы тоже снизить свою потенциальную энергию!



**Рис. 10.2.6.** (а) Если одноименные заряды поместить внутри полой проводящей сферы, они отталкиваются друг от друга и устремляются к поверхности сферы. (б) После того как заряды на поверхности сферы достигли равновесия, она имеет единый одинаковый потенциал и напряженность электрического поля внутри нее равна нулю. Снаружи, вне сферы, потенциал уменьшается до нуля и существует электрическое поле.

\* Что же представляет собой эта “химическая” сила? Если металл твердый, то это просто сила упругости, которая не дает телу разорваться на куски. Если металл жидкий, например, это капля ртути, то ее держит вместе сила поверхностного натяжения. При возрастании заряда капли электростатические силы могут превысить силы поверхностного натяжения, и капля разорвется на мелкие капли. Это используют, например, при окраске автомобилей в сильном электрическом поле, ведь мелкие капли обеспечивают более качественную покраску.

Поскольку в нашем маленьком однородном шаре единственным видом потенциальной энергии, которая существенно влияет на заряды, является электростатическая, каждый заряд в нашем шаре фактически обладает одинаковой электростатической потенциальной энергией. А поскольку потенциал равен электростатической потенциальной энергии, приходящейся на единицу заряда, равная потенциальная энергия на равных зарядах означает равные потенциалы — все точки на поверхности шара имеют один и тот же постоянный потенциал! Если продолжить нашу аналогию “потенциал — высота”, то можно сказать, что в состоянии равновесия уровень воды в бассейне одинаков и постоянен.

Благодаря идеальной симметрии шара, в состоянии равновесия заряды равномерно распределены по его поверхности. Если бы мы выбрали не такой симметричный проводник, а, скажем, тонкую металлическую нить коронатора копира, заряды в состоянии равновесия не были бы распределены так равномерно. Тем не менее эти заряды все равно находились бы на внешней поверхности тела и во всех точках проводника в состоянии равновесия потенциал был бы одинаковым и постоянным.

### Потенциал и заряд проводника

Если заряды находятся в равновесии, однородный проводник имеет одинаковый постоянный потенциал, а его суммарный заряд во всех точках внутри него равен нулю.

Но в то время как потенциал постоянен на поверхности и внутри нити нашего копировального аппарата, он резко изменяется снаружи (рис. 10.2.6, б). Значительные пространственные изменения потенциала обуславливают возникновение сильного электрического поля. Изменение потенциала в пространстве, которое по-научному называется градиентом потенциала, можно представить как его “крутой склон”. В нашем примере “потенциал — высота” градиент потенциала аналогичен “градиенту высоты” — склону обычного холма. И подобно тому, как вода быстро стекает вниз по склону в сторону меньшей высоты, заряд в соответствии с градиентом потенциала устремляется в сторону более низкого потенциала.

Так как и электрическое поле, и градиент потенциала заставляют заряды ускоряться, мы не удивимся, узнав, что градиент потенциала и есть напряженность электрического поля. Второй источник электрических полей мы откроем для себя в следующей главе, а пока будем рассматривать градиент потенциала и напряженность электрического поля как эквивалентные величины. Их отношение можно записать в виде:

$$\text{напряженность электрического поля} = \text{градиент потенциала} = \frac{\text{разность потенциалов}}{\text{расстояние}} \quad (10.2.2),$$

где вектор напряженности электрического поля указывает направление наиболее быстрого уменьшения потенциала\*.

Это соотношение позволяет нам под другим углом взглянуть на электрическое поле. Напряженность электрического поля равна электростатической силе, действующей на единицу заряда, но также равна уменьшению потенциала, приходящемуся на единицу расстояния. Поэтому в системе СИ существует и другая единица напряженности электрического поля — вольт/метр (сокращенно В/м, или V/m). В/м — это то же самое, что Н/Кл. В качестве примера электрического поля, создаваемого разностью потенциалов, рассмотрим верхнюю часть обычной батареи 9 В. Расстояние между клеммами составляет всего лишь 0,005 м (5 мм), разность потенциалов между ними 9 В, таким образом, напряженность электрического поля, направленная на отрицательную клемму, будет равна примерно 1800 В/м.

### Проводники малого сечения и высокий потенциал: коронный разряд

В обычном воздухе пробой происходит при напряженности электрического поля около  $3 \times 10^6$  В/м (около 30 000 вольт на сантиметр). В таком поле свободные заряды ускоряются так быстро, что лавина столкновений, освобождающих заряды, в какой-то момент вдруг превращает воздух из почти идеального диэлектрика в достаточно хороший проводник. Вы и сами вполне способны получить такое

\* Градиент потенциала направлен в сторону его возрастания, т. е. в сторону, противоположную направлению напряженности электрического поля. Поэтому уравнение (10.2.2) выполняется только по модулю. Обычно его записывают в другом виде: напряженность электрического поля =  $-1 \times$  градиент потенциала.

сильное поле. В сухой зимний день вы можете покрыть себя положительными зарядами и увеличить потенциал до 30 000 вольт, просто прошаркав в обуви на резиновой подошве по ковровому покрытию у себя дома. Когда вы приблизитесь к заземленной дверной ручке с потенциалом 0 вольт, разность потенциалов между дверной ручкой и вашей рукой составит 30 000 вольт. Когда ваша рука окажется примерно в 1 см от дверной ручки, напряженность электрического поля достигнет 30 000 вольт/сантиметр и произойдет пробой воздуха с образованием блестящей искры (рис. 10.2.7).

Поскольку ваша рука и дверная ручка близки по размерам и форме, потенциал между ними меняется равномерно (рис. 10.2.8, а) от 0 вольт на дверной ручке до 30 000 вольт на вашей руке, так что градиент потенциала (или напряженность электрического поля) можно считать постоянным. Но когда два тела существенно отличаются по размеру, более крупное тело доминирует в распределении потенциала в пространстве между ними. Например, если вы подносите к двери длинную булавку или иглу, то на большей части расстояния между ними контролировать потенциал будет дверная ручка и резкое повышение потенциала будет происходить только возле самого кончика булавки (рис. 10.2.8, б). Вместо того чтобы быть равномерным, градиент потенциала (или напряженность электрического поля) будет самым высоким вблизи этой точки.

Копировальный аппарат умело использует эту неоднородность поля. Нить коронатора (тонкий высоковольтный проводник) окружена гораздо более массивным металлическим кожухом. Нить настолько тонка, что ее влияние исчезает на ничтожном расстоянии от ее поверхности, а почти на всем расстоянии между заземленным кожухом и проводом в распределении потенциала доминирует ко-



Рис. 10.2.7. Эти два металлических шарика находятся на расстоянии 1 см друг от друга. Когда разность потенциалов между ними равна примерно 30 000 В, происходит пробой воздуха с образованием искры.

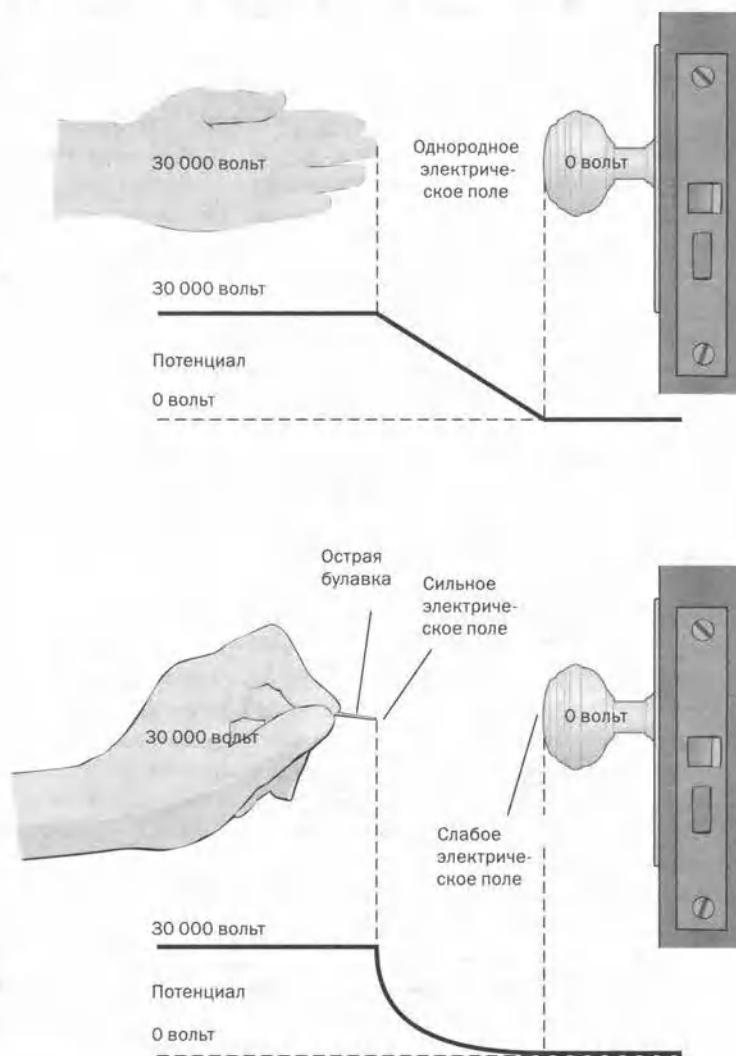
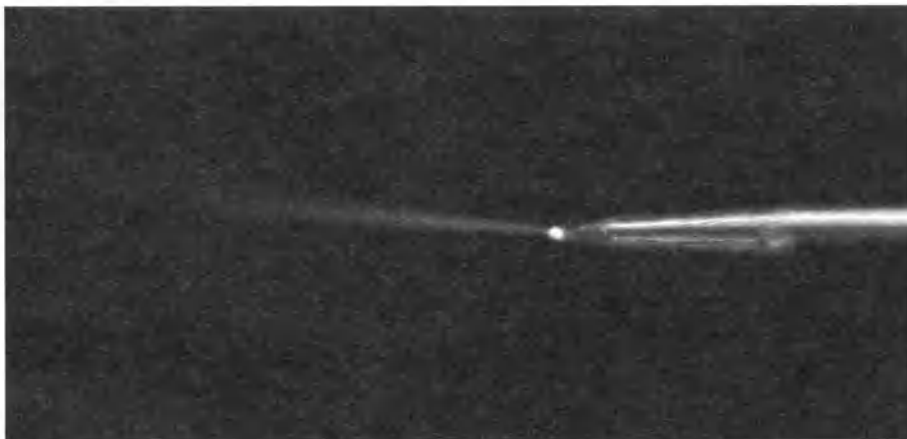


Рис. 10.2.8. Ваш потенциал составляет 30 000 В. Вы подносите руку к дверной ручке с потенциалом 0 В. (а) Так как ваша рука и дверная ручка близки по размерам, потенциал между ними уменьшается равномерно и электрическое поле достаточно однородно. (б) Однако если вы держите в руке булавку, то потенциал вблизи ее острия резко падает, а электрическое поле там очень сильное.

жух. Несмотря на то что отрицательный потенциал проводника-нити составляет всего  $-3000$  вольт, а расстояние до кожуха — около  $1$  см, потенциал в воздухе в непосредственной близости от нити изменяется так резко, что напряженность электрического поля там с легкостью достигает значений  $30\ 000$  В/см и вызывает пробой воздуха.

Разряд, который образуется вблизи тонкого проводника, относится к особому виду саморегулируемых разрядов, который называется коронным разрядом (рис. 10.2.9). В то время как большинство разрядов не могут контролировать количество свободных зарядов, которое они производят, коронный разряд автоматически поддерживает их равномерное образование.

**Рис. 10.2.9.** Электрическое поле возле острой высоковольтной проволоки настолько сильно, что происходит пробой воздуха и возникает коронный разряд. Частички воздуха, получив в результате разряда энергию, образуют свечение.



\* Слой проводящей плазмы вокруг проволоки — тоже проводник, т. е. диаметром всего проводника следует считать диаметр этого слоя, а не диаметр самой проволоки.

❷ Вопреки распространенному мнению, громоотводы не просто привлекают молнии, чтобы защитить от удара кровлю здания. На самом деле они производят коронные разряды, которые уменьшают любые локально возникающие электрические заряды. Нейтрализуя локальный электрический заряд, громоотвод снижает вероятность того, что молния ударит в дом. Аналогичные устройства — электростатические разрядники — устанавливают на концах крыльев самолета, они защищают воздушные суда от ударов молнии.

Поскольку свободные заряды образуются только в сильном электрическом поле вблизи тонкого проводника, скорость их создания очень чувствительна к изменениям эффективной толщины проводника. Если в воздухе вблизи проводника слишком много свободных зарядов, их способность проводить электричество эффективно утолщает проводник, ослабляет электрическое поле и замедляет образование свободных зарядов\*. Разряд исправляет собственную ошибку.

Благодаря этому стабилизирующему эффекту воздух при коронном разряде сохраняет постоянную электропроводность, что идеально подходит для зарядки фотопроводника. Но коронные разряды были известны задолго до эпохи копировальных аппаратов. Они часто самопроизвольно возникают на острых концах предметов или возле тонких проводников при высокой напряженности электрического поля. В результате происходит утечка заряда от линий электропередачи, а иногда на мачтах и такелаже парусных судов образуется свечение, получившее название «огни святого Эльма» (см. ❷).

## Подготовка к копированию: индукционная зарядка

Коронный разряд не просто превращает воздух в проводник, он также распыляет электрические заряды. Эти заряды выталкиваются наружу под действием электрического поля, окружающего коронатор. Так как коронатор копира имеет отрицательный потенциал, вектор напряженности окружающего электрического поля направлен в его сторону. А поскольку отрицательные заряды движутся в направлении, противоположном направлению электрического поля, из коронатора выходит поток отрицательных зарядов. По мере того как фотопроводник с постоянной скоростью проходит вдоль коронатора, эти заряды равномерно распыляются по поверхности фотопроводника, которая в результате оказывается покрыта ровным слоем отрицательных зарядов.

Каждый отрицательный заряд, попадая на поверхность фотопроводника, притягивает положительный заряд, находящийся на заземленной металлической поверхности под фотопроводником. Притяжение между этими двумя зарядами, имеющими противоположные знаки, прочно удерживает их на месте. В то время как открытая поверхность фотопроводника приобретает равномерно распре-

ленный отрицательный заряд, металлический слой под ним приобретает эквивалентный положительный заряд (рис. 10.2.3, а). Процесс, при котором заземленный проводник приобретает заряд путем притяжения близлежащих зарядов противоположного знака, называется индукционной зарядкой.

Индукцированный положительный заряд на металлической стороне фотобарабана важен для ксерокопирования по нескольким причинам. Во-первых, он снижает электростатическую потенциальную энергию отрицательного заряда, так что отрицательный потенциал поверхности становится уже не столь велик. Во-вторых, если бы поблизости не было этого слоя положительных зарядов, то в результате отталкивания между одноименными зарядами отрицательные заряды на открытой поверхности оттеснились бы к краям фотобарабана и таким образом искажалось бы получаемое изображение.

Но что самое важное, слой положительных зарядов дает отрицательным зарядам возможность исчезнуть, когда на фотопроводник падает свет! На тех участках фотопроводника, которые превратились в проводник благодаря свету, упавшему от исходного документа, отрицательный и положительный заряды нейтрализуют друг друга и исчезают. Образовавшийся на фотопроводнике незаряженный участок не притягивает тонер и оставляет на готовой копии белый участок.

Рассмотрев весь цикл, мы теперь понимаем, как работает копир. С помощью коронного разряда он покрывает фотопроводящую поверхность отрицательными зарядами, а затем выборочно стирает части этого заряженного слоя светом от исходного документа. Оставшиеся заряженными участки фотопроводника притягивают положительно заряженные частицы тонера, который затем переносится на бумагу и там закрепляется.

Стоит отметить только одну деталь: по техническим причинам некоторые копировальные аппараты предварительно покрывают фотопроводник положительными, а не отрицательными зарядами, а затем используют их для притягивания отрицательно заряженного тонера. В таких устройствах на нить коронатора подается высокий положительный потенциал, и соответственно, коронатор распыляет положительные заряды.

## Цветные копиры и лазерные принтеры

---

Ксерокопирование не ограничивается черным и белым. Тонер может быть любого цвета, поэтому нетрудно получить красные или синие копии. Но чтобы создать полноцветную копию, копир должен работать с тремя-четырьмя разными тонерами. Три из них окрашены в основные цвета субтрактивной цветовой модели: желтый, голубой и пурпурный, четвертый — черный. Как я объясню в разделе 14.2, когда речь пойдет о газоразрядных лампах, желтый, пурпурный и голубой пигменты можно объединять в разных сочетаниях, которые наш глаз будет воспринимать как любой возможный цвет и оттенок. Черный тонер в принципе необязателен, но он улучшает контрастность изображения.

Для получения полноцветной копии цветной копировальный аппарат создает три или четыре отдельных электростатических изображения и использует их для переноса того или иного тонера на бумагу. Скрытые электростатические изображения образуются с помощью цветных фильтров. Таким образом, электростатическое изображение, которое управляет желтым тонером, образуется синим светом (желтый тонер поглощает синий свет, так же как черный тонер поглощает белый). Желтое, голубое и пурпурное тонерные изображения аккуратно совмещаются и переносятся на бумагу. Затем с помощью белого цвета создается еще одно электростатическое изображение, которое используется для нанесения черного тонера. Оно также переносится на бумагу, после чего происходит термическое закрепление. В результате получается полноцветная копия, которая выглядит почти так же, как оригинал.

Лазерные принтеры также представляют собой ксерографические устройства, отличие в том, что они используют лазерный луч, чтобы нанести электростатическое изображение непосредственно на фотобарабан. Вращающийся барабан предварительно заряжается от коронатора, а затем луч лазера быстро перемещается по поверхности барабана с помощью вращающегося зеркала. Там, где лазерный свет попадает на барабан, заряд проходит через фотопроводник, то есть этот участок разряжается. Компьютер принтера включает и выключает лазер по мере того, как

тот методично, шаг за шагом, по одной точке создает скрытое изображение. Затем принтер наносит на электростатическое изображение тонер и переносит его на бумагу. Правда, в большинстве лазерных принтеров используются различные электростатические приемы, чтобы получить обращенное изображение, то есть чтобы тонер притягивался только к участкам фотобарабана, подвергшимся действию лазерного луча. Это помогает принтеру получать чистый белый фон.

## Электронные очистители воздуха

Пыль не плавает в воздухе. Как и песчинки, частицы почвы, сажи, золы и пыльцы, из которой она состоит, пыль плотнее воздуха и должна была бы падать на землю. Однако сопротивление воздуха затрудняет ее оседание. Из-за того, что на крошечный объем пылинки приходится большая площадь поверхности, пылинка при движении через воздух испытывает большую силу вязкого трения. Даже при скорости всего несколько миллиметров в секунду сила сопротивления, действующая на частицу, может превышать ее вес.

Таким образом, установившаяся скорость осаждения частиц пыли очень мала — им требуются минуты или даже часы, чтобы преодолеть несколько метров неподвижного воздуха и опуститься на землю или на пол. Кроме того, движущийся воздух переносит пыль вместе с собой. Так как силы сопротивления препятствуют относительному движению пыли и воздуха, даже легкий восходящий поток воздуха может неопределенно долго держать пыль на высоте. Силы тяжести явно недостаточно, чтобы быстро осадить пыль.

Но предположим, что мы придадим частицам пыли в воздухе отрицательный заряд, а затем пропустим этот воздушный поток вдоль положительно заряженных осадительных пластин. Вблизи этих пластин на отрицательно заряженные пылинки будут действовать мощные электростатические силы. Пусть гравитация слишком слаба, чтобы очистить воздух, зато электростатические силы могут легко преодолеть силу вязкого трения и быстро высосать пылинки из воздуха (рис. 10.2.10).

Рис. 10.2.10. В электростатическом осадителе воздуха частицам пыли в загрязненном воздухе придается отрицательный заряд, чтобы затем пылинки притягивало к положительно заряженной поверхности.

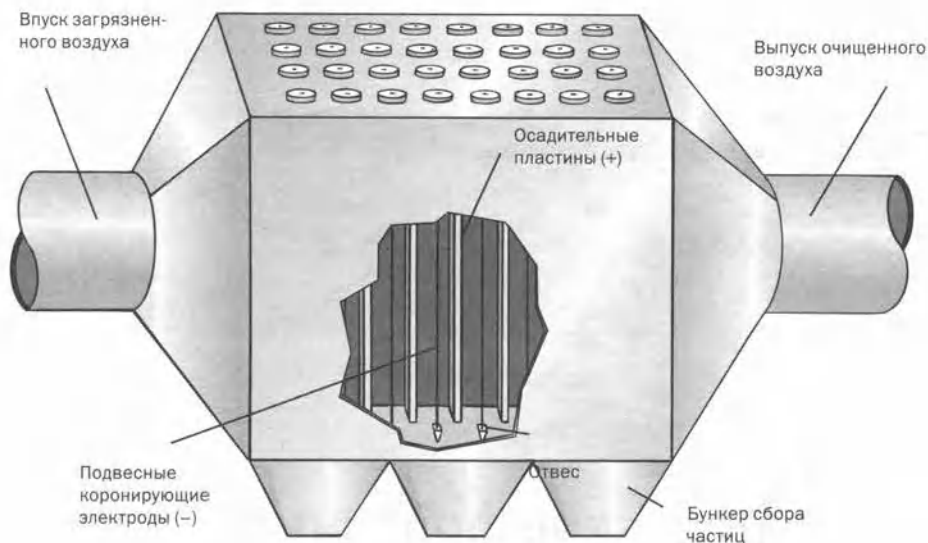


В 1906 году американский ученый и изобретатель Фредерик Гарднер Коттрелл (1877–1948), преподававший в то время в Калифорнийском университете в Беркли, стал сотрудничать с местными компаниями, которые пытались бороться с загрязнением воздуха в районе залива Сан-Франциско. В течение года Коттрелл изобрел электростатический осадитель и подарил патент некоммерческой корпорации, которую сам же и основал. Вот уже более столетия эта организация поддерживает научно-исследовательскую работу в США. Коттрелл пожертвовал личным состоянием, чтобы помочь многим молодым ученым.

В правильно спроектированном электронном очистителе эти пылинки оседают на заряженной пластине, и дальше воздух движется без них. Поскольку в очистителях для зарядки проходящей пыли используется коронный разряд, а для улавливания и сбора — электростатические силы, такой тип электронного воздухоочистителя называется электростатическим осадителем. Его главное преимущество по сравнению с фильтрами из пористой бумаги или волокон состоит в том, что на пластинах может накапливаться огромное количество пыли и при этом поток воздуха не блокируется. Кроме того, пластины легко чистить — достаточно встряхнуть их или промыть струей воды.

Но электростатический осадитель не может быть пассивным устройством, просто осаждающим отрицательно заряженные частицы пыли на положительно заряженные пластины. Если бы это было так, то сразу же происходила бы нейтрализация и очистка воздуха прекращалась бы. Для продолжения работы электростатический фильтр должен непрерывно поставлять электрические заряды и на пылинки, и на осадительные пластины. Вот почему электронный очиститель воздуха снабжен вы-





**Рис. 10.2.11.** В промышленном электрофильтре подвесные коронирующие электроды передают имеющимся в воздухе частицам отрицательный заряд. Эти частицы затем осаждаются на положительно заряженной поверхности. При энергичном встряхивании накопленные частицы сбрасываются и попадают в накопительный бункер для отходов.

соковольтным источником питания, который подает отрицательные заряды на его коронирующий электрод и положительные — на осадительные пластины.

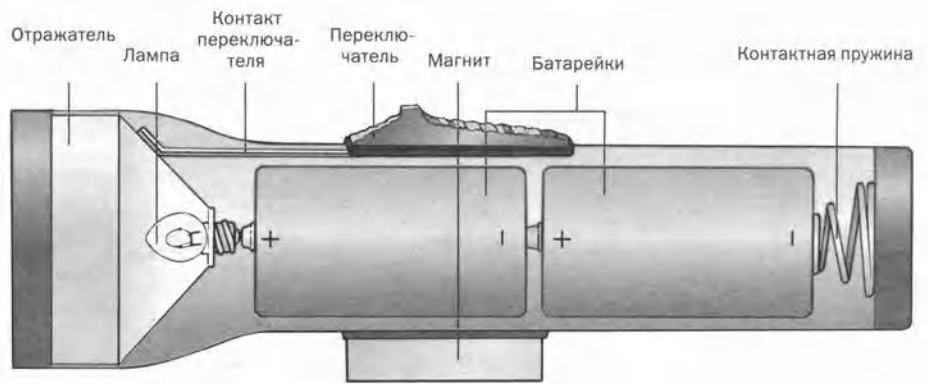
Собственно говоря, данная схема очистки требует лишь, чтобы пыль и осадительные пластины были противоположно заряжены, поэтому не во всех очистителях пыль получает отрицательный заряд. В некоторых, наоборот, пыль заряжается положительно и притягивается к отрицательно заряженным пластинам. Однако хотя отрицательные коронирующие электроды менее подвержены непредусмотренному искрению и проще в обслуживании, они также производят озон — агрессивную и токсичную форму кислорода. Приземный озон считается загрязнителем, поэтому в тех случаях, когда стоит задача свести к минимуму выбросы озона, применяют положительный коронный разряд и, следовательно, частицы пыли приобретают положительный заряд.

С тех самых пор, как в начале XX века были изобретены промышленные воздушные фильтры (рис. 10.2.11), их применяют для борьбы с загрязнением атмосферы практически во всех отраслях промышленности, где образуются выбросы (см. 3). В последние годы стали также довольно популярны бытовые электронные воздухоочистители. Некоторые наиболее продвинутые модели даже не нуждаются в вентиляторах: для создания циркуляции воздуха они используют притяжение между заряженными частицами пыли и осадительными пластинами (рис. 10.2.12).

Бытовые ионизаторы также удаляют из воздуха помещений пыль и дым. Эти устройства напоминают электростатические очистители, за исключением того, что в них нет осадительных пластин. Так же как в осадителях, в ионизаторах при помощи коронного разряда происходит зарядка частиц пыли, однако эти частицы прибор не пытается уловить. Вместо этого ионизатор позволяет электрически заряженным частицам — ионам — самостоятельно дрейфовать по комнате. Однако такое путешествие не бывает долгим, потому что ионы притягиваются к нейтральным поверхностям. Заряженная частица пыли электрически поляризует любую поверхность, к которой она приближается, а затем притягивается к этой поляризованной поверхности и прилипает к ней. Вы можете наблюдать этот эффект, если потрете воздушный шарик о волосы, а затем коснетесь им стены. Заряд шара будет поляризовать стену и шар «пристанет» к стене. Точно так же ионизатор удаляет частицы из воздуха, заставляя их приклеиваться к различным поверхностям. Это дешевый и эффективный метод, но в конце концов вся пыль оказывается на стенах и мебели — вряд ли вам понравится такое украшение, разве что вы очень любите серый цвет...



**Рис. 10.2.12.** В этом бытовом электронном очистителе воздуха внутри пластмассового корпуса размещены два коронирующих электрода и три осадительные пластины. Поток зарядов от электродов к пластинам заставляет воздух проходить через фильтр, поэтому в таком очистителе не нужен отдельный вентилятор.



## 10.3 Электрические фонарики

В устройстве обычного фонарика, кажется, нет ничего мудреного, и это легко заметить каждый раз, когда вы открываете его для замены батарей, — всего несколько деталей! Но фонарик — это не механическое устройство, а электрическое: он содержит электрическую цепь, и почти все его компоненты участвуют в протекании тока. Если вы понимаете, как работает фонарик, — значит, сможете понять и то, как работает электрическая цепь и как электричество переносит энергию от батарей к лампочке. Как мы увидим, фонарик не так прост, как кажется.

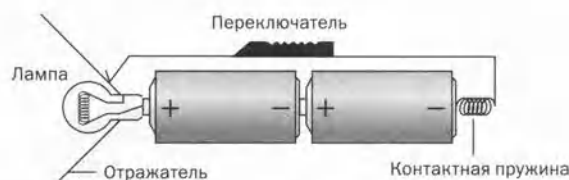
### Электричество и электрическая цепь фонарика

Простейший фонарик состоит всего из трех частей — батарейки, лампочки и переключателя, которые соединены между собой металлическими пластинками. Если переключатель включен, пластинки передают энергию от батареи к лампочке. Но как энергия движется по пластинкам и каким образом переключатель запускает или останавливает эту передачу энергии? Чтобы ответить на эти вопросы, мы должны сначала понять, что такое электричество и электрическая цепь. С этого и начнем.

Когда вы включаете фонарик, электричество передает энергию от батареек к лампочке. Электрический ток — поток электрических зарядов — течет по компонентам фонарика, неся с собой энергию. Очень скоро мы подробно рассмотрим природу тока, а пока что вы можете представить его себе в виде равномерного потока мельчайших положительных зарядов, движущихся по кругу через батарею, через лампочку, а затем обратно в батарею, чтобы начать следующий круг (рис. 10.3.1). Пока фонарик включен, заряды следуют по этому маршруту, получая энергию от батареи и доставляя ее к лампочке, и так раз за разом. При этом заряды несут энергию главным образом в виде электрической потенциальной энергии.

Круговой маршрут, который совершают заряды, называется электрической цепью. Поскольку цепь не имеет ни начала, ни конца, заряды не могут накапливаться в одном месте, где их взаимное отталкивание в конце концов приведет к остановке потока. Цепи присутствуют практически во всех электрических устройствах и объясняют, почему в кабеле питания любого домашнего прибора должно быть по крайней мере два провода: по одному проводу заряды идут к устройству, чтобы доставить энергию, а по другому возвращаются назад к источнику питания за следующей порцией.

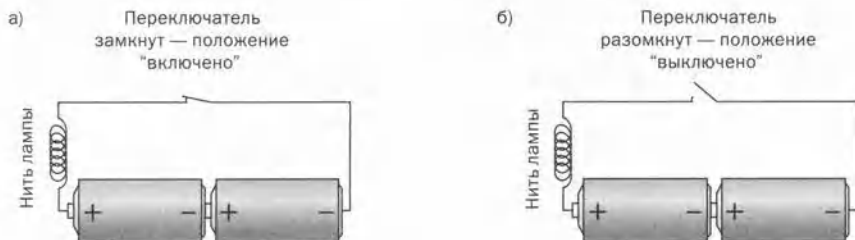
**Рис. 10.3.1.** Фонарик содержит одну или несколько батарей, лампу, переключатель и несколько соединительных металлических пластинок или полосок. Когда переключатель включен (как показано на рисунке), составные элементы фонарика образуют непрерывное кольцо проводящих элементов. Направление потока электронов по этой цепи — против часовой стрелки.



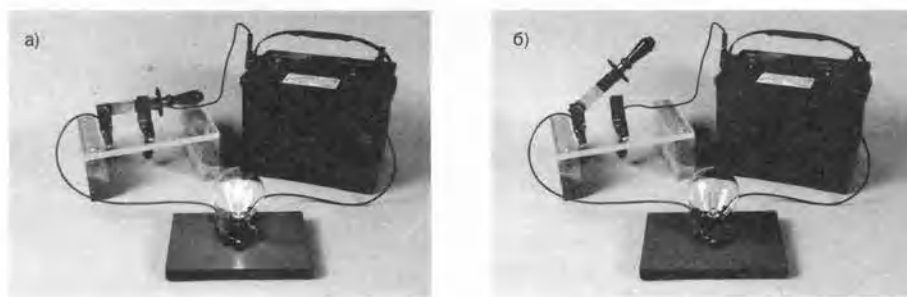
Но какова здесь роль переключателя? Будучи частью одного из проводящих путей между батареей и лампой, переключатель может замкнуть или разомкнуть цепь фонарика (рис. 10.3.2). Когда фонарик включен, переключатель замыкает цепь, так что заряды могут непрерывно течь по замкнутому контуру (рис. 10.3.2, а). Замкнутый контур изображен на рис. 10.3.3 слева.

Однако когда вы выключаете фонарик, переключатель разрывает цепь и образуется незамкнутый контур (рис. 10.3.2, б). И хотя один проводящий путь еще соединяет батареи и лампу, цепь теперь имеет разрыв и не может проводить непрерывный ток. Вместо этого заряды накапливаются в месте разрыва и через фонарик перестает течь ток. Поскольку энергия не может добраться до лампочки, лампочка гаснет. Разомкнутая цепь изображена на рис. 10.3.3 справа.

Существует еще один тип цепи, который стоит упомянуть. Когда случайно соприкасаются друг с другом два отдельных провода, соединяющие батареи с лампой, происходит короткое замыкание (рис. 10.3.4). Этот непреднамеренный кон-



**Рис. 10.3.2.** (а) Когда переключатель включен, он замыкает цепь, так что ток может непрерывно течь от батареи через нить накала лампы и снова через батареи. Ток вновь и вновь повторяет этот путь. (б) Когда переключатель фонарика выключен, он размыкает цепь и ток прекращается.

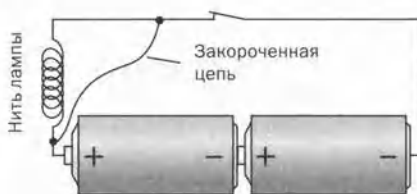


**Рис. 10.3.3.** (а) Когда большой рубильник (слева) включен, ток течет по всему замкнутому контуру и несет энергию от батареи к лампочке. (б) Когда рубильник выключен, через разомкнутую цепь ток не течет.

такт создает новую, более короткую цепь, по которой может течь ток. Поскольку предполагается, что лампа должна извлекать энергию из зарядов, она спроектирована таким образом, чтобы препятствовать их потоку и преобразовывать их электрическую потенциальную энергию в тепловую энергию и свет. Это противодействие потоку электричества называется электрическим сопротивлением. Так как сопротивление укороченной цепи очень мало, большая часть зарядов течет по ней, минуя лампу. Лампа тускнеет или гаснет совсем.

Поскольку лампа является единственной частью фонаря, которая рассчитана на нагревание, короткое замыкание лишает заряды доступа к тому месту, где они могли бы без всякой опасности избавиться от электрической потенциальной энергии. Вместо этого они выделяют энергию в батареях и металлических проводах, создавая угрозу, потому что провода при этом опасно нагреваются. Короткое замыкание может вызвать пожар, поэтому в фонариках и другом электрическом оборудовании стараются их избежать.

**Рис. 10.3.4.** Если непредусмотренный и нежелательный проводник позволит току обойти нить лампы фонарика, образуется короткое замыкание. Так как электронам некуда девать энергию, место короткого замыкания нагревается.



Каждая из мельчайших заряженных частиц, протекающих по цепи фонарика, несет только одну элементарную единицу электрического заряда и ничтожно малое количество электрической потенциальной энергии. Однако поскольку количество этих зарядов невероятно велико, то они каждую секунду передают значительное количество энергии — величину, которую мы называем мощностью и измеряем в ваттах (Вт, или W, см. также раздел 2.2). Чтобы поддерживать ровное и яркое свечение нити, лампе необходимо определенное количество энергии, то есть определенная мощность. Можно рассчитать, сколько энергии получает лампа за одну секунду, умножив количество элементарных зарядов, проходящих через лампу каждую секунду, на количество энергии, которое несет каждый из них.

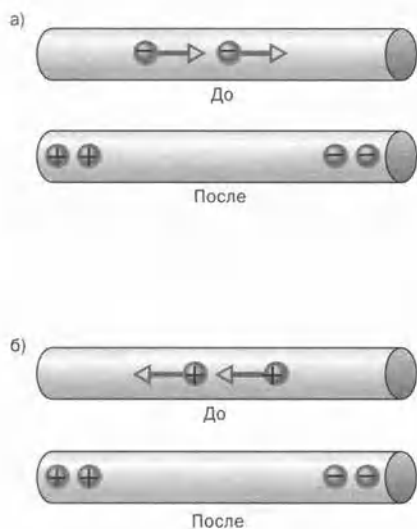
Но элементарных частиц слишком много, чтобы все их сосчитать! Гораздо удобнее измерить ток, текущий по цепи, то есть количество зарядов, проходящих через определенную точку цепи в единицу времени. В системе СИ единицей силы тока является ампер (сокращенно А). Ампер соответствует заряду в 1 Кл (1 кулон), проходящему через определенную точку за одну секунду. Один кулон — это приблизительно  $6,25 \times 10^{18}$ , или 6 250 000 000 000 000 элементарных зарядов, так что даже ток силой всего 1 А несет огромный поток элементарных зарядов.

Используя силу тока вместо количества зарядов, мы можем определить, какое количество энергии достигло лампы, умножив силу тока на величину электрической энергии, приходящейся на кулон, — эту величину мы уже знаем как разность потенциалов или напряжение. Например, ток силой 2 ампера (2 кулона в секунду) при напряжении 3 вольта (3 джоуля на кулон) передаст лампочке 6 Вт (6 джоулей в секунду) мощности. Чем ярче фонарик, тем выше либо сила тока, либо напряжение, либо и то и другое.

Ток имеет направление, совпадающее с направлением потока положительно заряженных частиц. Если включить фонарик, изображенный на стр. 362 вверху, поток зарядов в цепи будет направлен по часовой стрелке — от с клеммы передней батареи через нить лампы и через переключатель к отрицательной клемме задней батареи. А вот теперь пришло время сделать щекотливое признание: дело в том, что положительные заряды, которые якобы текут в этой цепи по часовой стрелке, — фикция! На самом деле электрический ток — это поток отрицательно заряженных электронов, который движется в противоположном направлении!

Истоки этой путаницы — в неудачном выборе Франклина в вопросе о том, какие заряды назвать положительными, а какие — отрицательными. К тому времени, когда ученые открыли электроны и поняли, что именно эти отрицательно заряженные частицы несут ток по проводам, уже существовало определение тока, согласно которому его направление совпадало с направлением потока положительных зарядов. Так как было уже поздно менять определение и вводить новое, согласно которому ток и поток электронов двигались бы в одном направлении, ученые и инженеры просто делают вид, что ток переносится вымышленными «положительными зарядами», движущимися в том же направлении, что и ток.

Как можно показать на простом примере, эта условность прекрасно работает. Когда отрицательно заряженные электроны движутся вправо через нейтральный отрезок провода, правый конец провода становится заряженным отрицательно, а левый конец — положительно (рис. 10.3.5, а). Но ровно то же самое произошло бы, если бы через тот же кусок провода должен был идти влево поток воображаемых положительно заряженных частиц (рис. 10.3.5, б). Без сложных приборов вы не можете сказать, текут ли отрицательные заряды вправо или положительные — влево, потому что конечный результат, по сути, один и тот же. Мы тоже принимаем эту условность и делаем вид, что ток — это течение положительно заряженных частиц. В этой и последующих главах мы перестанем думать об электронах, а будем представлять себе электричество как поток положительных зарядов, движущихся в направлении тока. Есть только несколько особых случаев, когда имеют значение сами электроны, и мы будем рассматривать такие ситуации отдельно по мере их возникновения.



**Рис. 10.3.5.** Поток отрицательно заряженных частиц, идущий через отрезок проводника вправо (а), не так легко отличить от потока положительно заряженных частиц, направленного влево (б). Результатом обоих процессов становится накопление положительного заряда на левом конце провода и отрицательного — на правом.

Батарея — это главным образом портативный источник электроэнергии, но я предлагаю вам два способа взглянуть на это устройство под другим углом. Первая точка зрения довольно абстрактна: представьте себе, что батарея — это разновидность насоса. Она “перекачивает” заряд от низкого потенциала к более высокому потенциалу, так же как водяной насос качает воду снизу вверх, с маленькой высоты на большую. Вот и еще раз пригодилась наша аналогия “потенциал — высота”.

Каждый из этих насосов перемещает нечто против естественного направления потока, толкает это нечто вперед и при этом совершает над ним работу. Батарея увеличивает электрическую потенциальную энергию заряда, толкая его вверх вдоль градиента потенциала, в то время как водяной насос увеличивает гравитационную потенциальную энергию воды, толкая ее вверх вдоль градиента высоты.

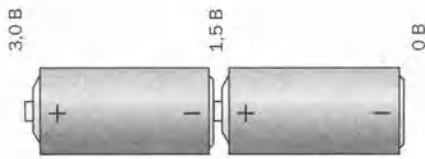
Второй способ взглянуть на батарею — более механистический: батарея — это устройство, управляемое химическими силами. Она использует химические силы, чтобы перенести заряды с отрицательного вывода к положительному. По мере того как положительные заряды накапливаются на положительном выводе батареи, потенциал там увеличивается, а по мере того как отрицательные заряды накапливаются на отрицательном выводе, потенциал там падает. Так как батарея выполняет работу по передаче зарядов от низкого потенциала к высокому, она преобразует свою химическую потенциальную энергию в электрическую потенциальную энергию этих разделенных зарядов.

Номинальное напряжение батареи отражает происходящие в ней химические процессы, в частности количество химической потенциальной энергии, доступной для каждого переноса заряда. Когда разность потенциалов между клеммами растет, увеличивается и количество энергии, необходимой для переноса каждого заряда. В конце концов наступает момент, когда химические вещества уже не могут совершить работу, достаточную для того, чтобы оторвать заряд от отрицательной клеммы батареи и перенести его к положительной, поэтому перенос останавливается. Батарея в этот момент находится в равновесии: электростатические силы, противодействующие следующему переносу заряда, уравновешивают химические силы, способствующие переносу. Обычная щелочная батарея достигает этого равновесия, когда потенциал положительной клеммы на 1,5 В выше потенциала отрицательной. Литиевые батареи, химически более активные, могут достигать разности потенциалов, то есть напряжения в 3 и более вольт.

Включая фонарик, вы нарушаете равновесие батареи, позволяя зарядам покинуть положительную клемму и перейти к отрицательной. Когда разделенных зарядов становится меньше, разность потенциалов (напряжение) между клеммами слегка уменьшается и батарея снова начинает перекачивать заряды. Возобновившийся процесс восполняет количество разделенных зарядов на клеммах и противодействует любому дальнейшему снижению напряжения батареи. Таким образом, щелочная батарея с номинальным напряжением 1,5 В сохраняет почти постоянную разность потенциалов между клеммами, равную примерно 1,5 В, вне зависимости от того, включен фонарик или выключен.

Работа щелочной батареи основана на электрохимической реакции, в которой порошкообразный цинк на ее отрицательной клемме реагирует с пастообразным диоксидом марганца на положительной. Эта реакция напоминает реакцию контролируемого сжигания. В сущности, батарея “сжигает” цинк, чтобы получить энергию, необходимую для перекачки зарядов с отрицательной клеммы на положительную. Однако по мере того как батарея расходует свою химическую потенциальную энергию, ее способность к перекачиванию зарядов уменьшается. Когда химические вещества почти израсходованы, возросшая неупорядоченность батареи снижает ее напряжение. Стареющая батарея перекачивает меньший поток зарядов и придает им меньший потенциал, чем новая. В конечном счете это приводит к тому, что до лампы доходит все меньше энергии и ее свет становится все более тусклым.

В большинстве фонариков используется не одна, а несколько батарей. Когда две щелочные батареи последовательно соединены в цепочку, так что поло-



**Рис. 10.3.6.** Когда две батарейки по 1,5 В соединены в цепь, их потенциалы складываются таким образом, что потенциал положительного вывода цепи на 3 В выше, чем потенциал отрицательного. Если принять потенциал отрицательного вывода за 0, тогда потенциал положительного будет равен 3,0 В.



**Рис. 10.3.7.** Эта 9-вольтовая батарея на самом деле состоит из шести маленьких 1,5-вольтовых батареек, соединенных в одну цепь. Положительные заряды, поступающие в цепь на отрицательном выводе батареи, проходят через все шесть ячеек, пока наконец не добираются до положительного вывода батареи.



**Рис. 10.3.8.** Когда в цепи одна из трех батарей установлена задом наперед, потенциал развернутой батареи вычитается из суммы потенциалов двух других. Суммарная разность потенциалов между положительным и отрицательным выводами составляет только 1,5 В. Развернутая батарея подзаряжается.

жительная клемма одной батареи касается отрицательной клеммы другой, две батареи работают вместе, перенося заряды с отрицательной клеммы цепи к ее положительной клемме (**рис. 10.3.6**). Каждая батарея перекачивает заряды, пока разность потенциалов между положительным и отрицательным клеммами составляет 1,5 В, таким образом, потенциал положительного вывода цепи на 3,0 В выше потенциала ее отрицательного вывода.

Так как заряды никогда не покидают цепь фонарика, в этой цепи имеет значение только относительная разность потенциалов. Мы увидим, что гораздо удобнее игнорировать абсолютные потенциалы, и примем потенциал отрицательного вывода цепи за 0 В (**рис. 10.3.6**). С учетом этого потенциал его положительного вывода составит 3,0 В.

Чем больше батарей в цепи фонарика, тем больше энергии в итоге получает заряд и тем больше разность потенциалов между отрицательным и положительным выводами цепи. У фонарика, в цепи которого шесть щелочных батареек, разность потенциалов между положительным и отрицательным выводами составляет 9 В. Обычная 9-вольтовая батарея на самом деле содержит цепь из шести миниатюрных 1,5-вольтовых батарей, расположенных таким образом, что их напряжение в сумме составляет 9 В (**рис. 10.3.7**).

Если одну из батарей в цепи развернуть, поменяв местами клеммы, эта развернутая батарея будет извлекать энергию из любого проходящего через нее заряда (**рис. 10.3.8**). Несмотря на то, что цепь все равно может перекачивать заряд от своего отрицательного вывода к положительному, суммарное напряжение цепи уменьшится, потому что вместо того, чтобы добавлять 1,5 В к общему напряжению цепи, развернутая батарея будет вычитать эту величину. Если цепь состоит из трех батарей, две будут добавлять зарядам энергию, а одна будет вычитать ее, и общее напряжение цепи будет только 1,5 В.

Когда развернутая батарея берет энергию у проходящих через нее зарядов, по крайней мере часть этой энергии превращается в химическую потенциальную энергию. То есть развернутая батарея снова подзаряжается! Эта концепция взята на вооружение в зарядных устройствах, где ток пропускается через батарею в обратном направлении, от положительного вывода к отрицательному, чтобы восстановить в заряжаемой батарее запас химической потенциальной энергии. Тем не менее обычные щелочные батарейки — одноразовые. Это означает, что при попытке подзарядить их они превращают большую часть получаемой энергии в тепловую, а не химическую потенциальную энергию. Одноразовые батареи, если вставить их в зарядное устройство для многоразовых аккумуляторов, могут перегреться и даже взорваться.

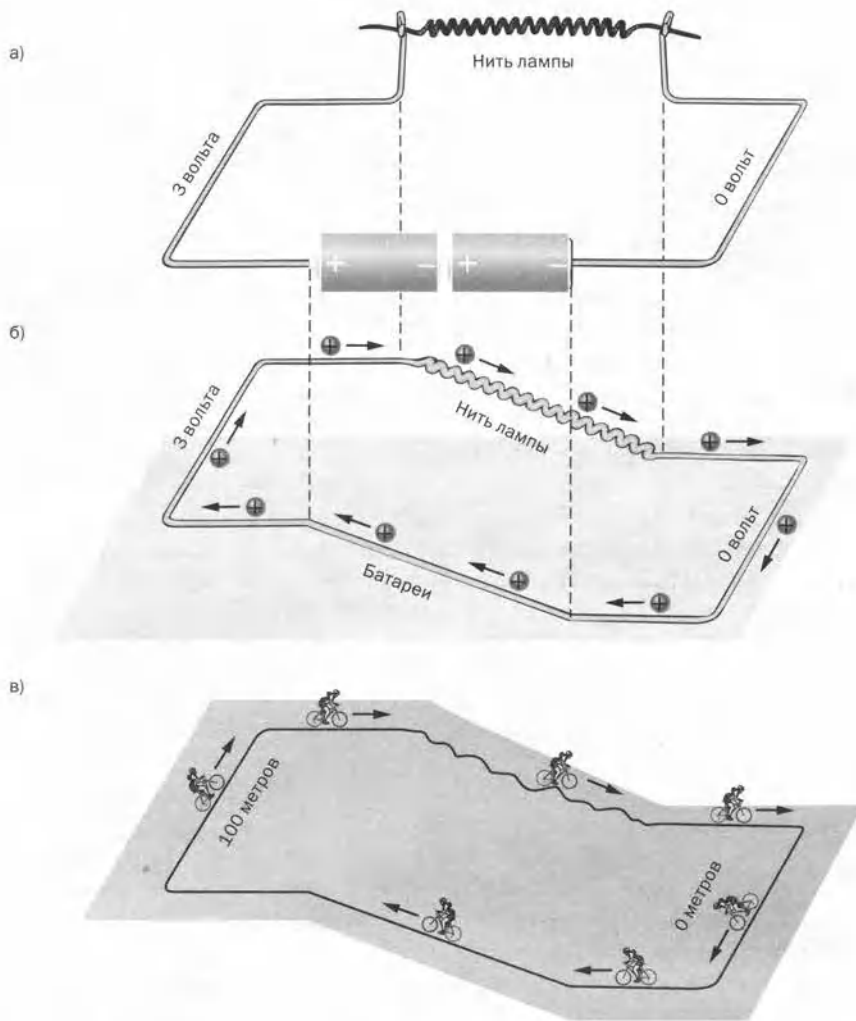
## Лампочки и металлические пластинки

В то время как батарея передает зарядам электрическую потенциальную энергию, толкая их вверх вдоль градиента потенциала, лампа высвобождает эту электрическую потенциальную энергию, позволяя зарядам скользить вниз вдоль другого градиента потенциала. Эти два устройства образуют идеальную пару: батарея обеспечивает подачу электроэнергии, а лампа потребляет ее. Еще в главе 7 мы узнали, что лампа использует эту энергию для нагревания вольфрамовой нити накала, чтобы получить свет. Теперь пришло время узнать, как именно электричество нагревает нить.

Рассмотрим фонарик с двумя щелочными батарейками (**рис. 10.3.9, а**). Нить лампы — проводник малого сечения, оба конца которого электрически соединены с двумя выводами цепи батарей. Поскольку потенциал на одном выводе равен 3,0 В, а на другом — 0 В, вдоль нити проходит градиент потенциала и, следовательно, электрическое поле. Но как это возможно? Говоря о копируемых аппаратах, мы отмечали, что потенциал равномерно распределен по проводнику. Разве нить лампы не нарушает это правило?

Нет. Проводник имеет равномерно распределенный потенциал, когда его заряды находятся в равновесии, а заряды в лампе находятся в равновесии лишь в том случае, если фонарик выключен. При включении между концами нити возникает разность потенциалов в 3 В, и заряды нити моментально устремляются вниз вдоль градиента потенциала в сторону нулевого потенциала.

Пользуясь нашей аналогией “потенциал — высота”, представим себе, что мы вдруг наклонили совершенно ровное поле, превратив его в склон, и вода, которая



**Рис. 10.3.9.** (а) В электрической цепи фонарика ток передает энергию от батарей к нити накаливания лампы. (б) Потенциал поднимается в батареях и снижается в нити. Несмотря на то, что электрическое поле внутри нити толкает заряды вперед, они двигаются с постоянной скоростью из-за столкновений с другими частицами. (в) Такое поведение аналогично поведению велосипедиста, который нажимает на педали, поднимаясь по ровному склону холма, но затем с постоянной скоростью спускается по неровному склону.

до этого неподвижно стояла на поле, устремилась вниз по склону. Но коль скоро мы рассматриваем отдельные заряды, еще лучше пример с велосипедистами: представьте себе сотни велосипедистов на ровном поле, которое вдруг наклоняется, образуя склон. Теперь все они с ускорением скатываются вниз.

Если бы нить лампы была идеальным проводником электричества, каждый заряд с равномерным ускорением двигался бы вниз вдоль градиента потенциала, при этом его электрическая потенциальная энергия превращалась бы в кинетическую. Но нить имеет большое электрическое сопротивление и значительно затрудняет прохождение электрического тока. Каждый заряд спускается вдоль градиента потенциала, постоянно сталкиваясь по пути с атомами вольфрамовой нити и колеблясь от этих столкновений. При каждом столкновении заряд отдает часть своей кинетической энергии (**рис. 10.3.9, б**). То, что начиналось как электрическая потенциальная энергия зарядов, превращается в тепловую энергию атомов вольфрама — и вот уже нить накаливания ярко светится. Обратимся снова к нашему примеру “потенциал — высота”: снова представим себе, как велосипедисты несутся вниз, но на этот раз по неровному склону, усыпанному камнями и ветками (**рис. 10.3.9, в**). Вместо плавного ускорения они набивают себе синяки.

А как насчет этих металлических пластин, которые соединяют батарею с лампой? Эти толстые проводники имеют небольшое электрическое сопротивле-

ние, поэтому с легкостью проводят ток. Заряды покидают пластинку, имея почти такой же запас электрической потенциальной энергии, какой у них был на входе, так что потенциалы на обоих концах полоски почти равны. В целом чем меньше электрическое сопротивление проводов, по которым ток течет к лампе и от нее, тем меньше энергии теряется по пути и тем больше энергии доходит до лампы. Вот почему так важно использовать для соединения толстые металлические полосы или даже металлический корпус фонарика.

Плохое соединение в любой точке цепи может снизить эффективность передачи энергии. Если на клеммах батареи есть грязь или жир или износились детали переключателя, току придется преодолевать увеличившееся электрическое сопротивление и тратить на это энергию. Можно попробовать улучшить соединение: потрясти фонарик или очистить металлические поверхности, тогда ток в цепи увеличится, потери энергии снизятся и лампочка вновь начнет светить ярче.

## Фонарик: напряжение, сила тока и мощность

---

Когда вы включаете фонарик, электрический ток несет энергию от двух щелочных батарей к лампе. Давайте предположим, что по цепи фонарика течет ток силой 1 А, и попробуем рассчитать, сколько энергии он передает. Лампа потребляет электроэнергию, потому что ток, проходя через нее, скатывается вниз вдоль градиента потенциала и его потенциал падает. Падение потенциала, или напряжение, соответствует количеству электрической потенциальной энергии, которую теряет единица заряда, преодолевая сопротивление нити. Умножив напряжение (разность потенциалов) на силу тока, проходящего через лампу, узнаем энергию, которую получила лампа:

$$\text{потребленная энергия} = \text{напряжение} \times \text{сила тока} \quad (10.3.1)$$

Поскольку разность потенциалов на лампе составляет 3 В, а сила тока, проходящего через нее, — 1 А, следовательно, лампа получила 3 Вт энергии. Другими словами, потребляемая мощность лампы составила 3 Вт.

Цепь из батарей производит электроэнергию, потому что потенциал проходящего через нее тока возрастает из-за градиента потенциала. Увеличение потенциала, или напряжение, соответствует количеству электрической потенциальной энергии, которую приобретает единица заряда при протекании через батареи. Умножив величину, на которую возрос потенциал (а это и есть напряжение), на силу тока, проходящего через батареи, узнаем количество произведенной батареями энергии:

$$\text{произведенная энергия} = \text{напряжение} \times \text{сила тока} \quad (10.3.2)$$

Поскольку в цепи батарей потенциал возрастает на 3 В, а сила тока, проходящего через нее, — 1 А, следовательно, произведено 3 Вт энергии. Другими словами, произведена мощность 3 Вт.

## Выбираем лампочку: закон Ома

---

Лампа в нашем фонарике рассчитана на нормальную работу при напряжении 3,0 В. При таком напряжении она будет пропускать ток силой 1 А и, следовательно, потреблять 3 Вт электроэнергии: ровно столько, сколько нужно, чтобы обеспечить нормальное свечение. Если вы используете в этом же фонарике другую лампу, рассчитанную на другое рабочее напряжение, то ее нити придется пропускать через себя непредусмотренное количество зарядов и получать отличающееся от расчетного количество энергии. Если энергии будет слишком много — лампочка быстро перегорит, если слишком мало — будет светить слишком тускло.

Очевидно, что нить лампы должна строго соответствовать характеристикам фонаря, в частности напряжению в цепи батарей. Например, для фонарика с несколькими батарейками требуется лампочка, рассчитанная на работу в условиях больших перепадов напряжения. Но каким образом ток, пропускаемый определенной нитью, связан с разностью потенциалов на концах нити и почему различные лампы по-разному реагируют на одинаковое падение напряжения?





**Рис. 10.3.10.** При прохождении через эту нить заряды испытывают падение напряжения, равное 3 В. Возникающее в результате электрическое поле толкает их вперед. Заряды сохраняют постоянную скорость, несмотря на частые столкновения с атомами вольфрама.

Связь между током и напряжением — это результат столкновений. Заряды фактически останавливаются всякий раз, когда врезаются в атомы вольфрама, поэтому им нужен толчок от электрического поля, чтобы продолжать движение (**рис. 10.3.10**). Увеличение напряженности электрического поля в два раза увеличивает среднюю скорость каждого заряда, а так как количество подвижных зарядов в нити фиксировано, ток, протекающий через нить, также увеличивается в два раза. Поскольку напряженность электрического поля, которое определяет силу тока, есть градиент потенциала нити, удвоение разности потенциалов (напряжения) на концах нити приводит также к удвоению силы тока.

И вновь вернемся к аналогии “потенциал — высота”. Представьте себе велосипедистов, которые едут вниз по чрезвычайно каменистому и ухабистому склону, не крутя педали. Эти ленивые велосипедисты будут останавливаться каждый раз, когда наедут на камень, и чтобы возобновить движение, им будет нужен толчок от склона. Но если в два раза увеличить градиент высоты (то есть крутизну склона), удвоится и средняя скорость каждого велосипедиста. Поскольку число велосипедистов, которые могут одновременно поместиться на склоне, всегда одно и то же, то и общее число велосипедистов, которые в данный момент скатываются с холма, также увеличится в два раза. Так как крутизна спуска, от которого зависит поток велосипедистов, есть градиент высоты холма, удвоение высоты холма также удваивает поток велосипедистов. (Уточним, что количество велосипедистов в нашей аналогии — это сила тока.)

Выбор нити влияет на протекание тока, поскольку у разных нитей разное электрическое сопротивление. Любые действия, которые увеличивают число подвижных электрических зарядов, проходящих через сечение нити, или помогают этим зарядам поддерживать более высокую среднюю скорость при данном падении потенциала (напряжении), будут уменьшать электрическое сопротивление нити и тем самым увеличивать силу тока. Собственно говоря, электрическое сопротивление определяется как падение потенциала в нити, деленное на силу тока, который возникает в результате этого падения. Делая нить толще или короче, можно снизить ее сопротивление, а изменяя состав нити, можно сделать столкновения более редкими.

Уже в который раз нам поможет аналогия “потенциал — высота” и пример с велосипедистами на склоне холма. Все, что увеличивает количество велосипедистов, одновременно находящихся на одном сечении (то есть на одной высоте склона); все, что позволяет велосипедистам поддерживать на данной высоте более высокую скорость, — все это будет уменьшать “сопротивление склона велосипедам” и увеличивать поток велосипедистов. “Сопротивление склона велосипедам” можно определить, как высоту склона, деленную на поток велосипедистов, которые он пропускает. Снижая высоту склона и увеличивая его ширину, можно снизить его “сопротивление велосипедам”. Очистив склон от камней, можно уменьшить количество наездов велосипедистов на камни, то есть сделать столкновения более редкими.

Объединив эти наблюдения, мы увидим, что ток, протекающий через нить, пропорционален разности потенциалов на концах нити (то есть напряжению) и обратно пропорционален ее электрическому сопротивлению. Это можно записать следующим образом:

$$\text{сила тока} = \frac{\text{напряжение}}{\text{электрическое сопротивление}} \quad (10.3.3).$$

❶ Немецкий физик Георг Симон Ом (1787–1854) был профессором математики сначала в колледже иезуитов в Кельне, а затем в Политехнической школе в Нюрнберге. Его многочисленные публикации ничем особым не выделялись, за исключением одной брошюры о взаимосвязи между током и напряжением. Этот выдающийся документ, написанный в 1827 году, первоначально не оценили другие физики, несмотря на солидную экспериментальную базу и на то, что теория Ома объясняла многие наблюдения, сделанные другими учеными. В отчаянии Ом оставил свою работу в Кельне. Только в 1840-х годов его работа наконец была должным образом признана. Ом получил должность профессора физики в Мюнхене всего за два года до смерти.

\* В отличие от большинства законов, описанных в этой книге, закон Ома не универсален. Многие вещества ведут себя в соответствии с ним, но не все. Например, ток, текущий через полупроводниковые устройства или вакуумные лампы, не подчиняется закону Ома.

В честь своего первооткрывателя, немецкого физика Георга Симона Ома (см. ❶), это соотношение получило название закона Ома\*.

Такая форма записи позволяет отделить причины (падение потенциала и электрическое сопротивление) от следствия (протекания тока). Однако чаще это уравнение записывают иначе, чтобы избежать деления. Тогда уравнение принимает привычный нам вид:

$$\text{напряжение} = \text{сила тока} \times \text{электрическое сопротивление} \quad (10.3.4)$$

В системе СИ единица электрического сопротивления, вольт/ампер, называется ом (обозначается Ом, или  $\Omega$ , от греческой буквы омега). Несмотря на кажущуюся простоту, закон Ома играет огромную роль в физике и электротехнике. Он применим к такому множеству систем, что почти все можно охарактеризовать с помощью понятия электрического сопротивления. Если известно электрическое сопротивление тела, то, зная напряжение, можно рассчитать силу тока или, зная силу тока, можно рассчитать напряжение. Системы, которые подчиняются закону Ома, часто называют омическими.

---

### **Закон Ома**

Напряжение на участке цепи равно силе тока, протекающего через этот участок, умноженной на его электрическое сопротивление.

---

И последнее. Электрическое сопротивление тела, как правило, зависит от температуры. Повышение температуры увеличивает количество подвижных зарядов, но также заставляет их чаще сталкиваться с колеблющимися атомами. Если преобладает увеличение частоты столкновений, как это происходит в металлах, сопротивление тела возрастает с повышением температуры. Например, сила тока в нити становится все меньше по мере приближения рабочей температуры, что помогает избежать перегрева нити. Тем не менее, если преобладает увеличение числа мобильных зарядов, как это происходит в полупроводниках, сопротивление тела с ростом температуры уменьшается. Это объясняет, почему полупроводниковые компьютерные чипы, разогреваясь, проводят все более сильный ток, а при чрезмерных температурах разрушаются.

---

## ГЛАВА 11

# МАГНИТЫ И ЭЛЕКТРОМАГНИТЫ

**М**агнетизм и все, что с ним связано, — не менее важная часть нашей повседневной жизни, чем электричество. Мы используем магниты, чтобы прикрепить записку на холодильник, чтобы понять, где север, а где юг, чтобы сохранить информацию на кредитной карте или жестком диске компьютера. Притяжение между противоположными полюсами магнитов кажется нам таким естественным явлением, что, вероятно, именно оно, а не притяжение между разноименными электрическими зарядами, приходит нам на ум, когда мы слышим привычную фразу “противоположности притягиваются”.

В общем, магниты встречаются нам повсюду, и иметь с ними дело относительно безопасно и просто. Если вы в последнее время не брали в руки пару магнетиков, стоит потратить минуту-другую, чтобы вновь почувствовать силы, действующие между магнитами, и понаблюдать, как эти силы меняются, когда вы двигаете или поворачиваете магниты. Способность магнитов влиять друг на друга, даже когда они разделены вашей ладонью, всегда кажется нам удивительно загадочной. Правда, с современными сильными магнитами надо быть осторожными: вы можете довольно болезненно защемить кожу между ними!

Однако разговор о магнетизме был бы неполным, если бы мы не включили в этот разговор электричество. Как мы увидим, темы электричества и магнетизма связаны друг с другом через ключевые слова: “изменение” и “движение”. Так, движение электрических зарядов создает магнитное поле, а изменение магнитного поля, в свою очередь, создает электродвижущую силу. Именно поэтому я в данной главе не мог ограничиться только магнетизмом — ведь самые интересные магнитные явления в нашем мире тесно связаны с электричеством.

Итак, в этой главе мы рассмотрим магнетизм как таковой, а также несколько предметов и устройств, в которых как раз и используется взаимосвязь электричества и магнетизма. Эту взаимосвязь изучает раздел физики, который называется электродинамика — не случайно же слово “динамика” говорит и об изменении, и о движении. Стремление к лаконичности — не единственная причина, почему в этом термине отсутствует упоминание о магнетизме; другая причина в том, что в большинстве случаев источником магнетизма фактически и является электричество. Другими словами, магнетизм — это на самом деле электромагнетизм.

- 372 **11.1 Магниты у нас дома**  
*Почему магнетики прилипают к холодильнику и как звенит дверной звонок.*
- 382 **11.2 Распределение электроэнергии**  
*Как электроэнергия передается от источника до вашего дома.*
- 393 **11.3 Электрические генераторы и двигатели**  
*Каким образом вращающиеся устройства производят электроэнергию, а электрические устройства вращаются.*
- 404 **11.4 Поезда на магнитной подушке**  
*Как следующее поколение поездов будет парить, опираясь на магниты.*
- 411 **11.5 Магнитная запись**  
*Как магнитные материалы записывают и хранят информацию.*



## 11.1 Магниты у нас дома

Что бы мы делали без этих магнитиков, которые удерживают бесчисленные записки-напоминалки на нашем холодильнике? Каким образом смог бы зазвонить дверной звонок, если бы не магнит? А как ориентироваться в лесу без компаса? А как, наконец, мы бы получили наличные в банкомате, если бы не магнитная полоса на нашей пластиковой карте?

Мы настолько привыкли к магнитам, что воспринимаем их как нечто совершенно обычное. Но бытовые магниты можно не только использовать по прямому назначению — помимо этого, они дают нам возможность поэкспериментировать с одной из основных сил природы. Хотя магнетизм, как мы уже сказали, настолько тесно связан с электричеством, что в конечном счете эти явления составляют единое целое, мы пока что начнем изучение магнетизма как отдельного феномена, а уже потом постепенно добавим в рассмотрение электричество.

### Магниты на холодильнике

Магнетики для холодильника бывают самых разнообразных форм и размеров, причем некоторые из них проявляют более сложные магнитные свойства, чем остальные. Начинать всегда лучше с простого, поэтому мы начнем с магнитов, имеющих форму пуговицы.

Когда вы подносите друг к другу два магнита-“пуговицы”, между ними начинают действовать некие силы. Это могут быть силы притяжения или отталкивания, в зависимости от того, как ориентированы магниты, но эти силы всегда ослабевают с расстоянием. Магнитные силы напоминают электрические, с которыми мы уже имели дело, вынимая высушенную одежду из горячего барабана стиральной машины. Однако имеется по крайней мере два важных различия. Во-первых, как бы вы ни поворачивали друг к другу два электрически заряженных предмета одежды, их притяжение не превратится в отталкивание или наоборот. Во-вторых, как бы вы ни располагали магниты относительно друг друга, вы не сможете получить магнитную искру, которая перескочила бы с одного магнита на другой. Выходит, электричество и магнетизм хоть и похожи, но все-таки чем-то отличаются? В чем же здесь дело?

Так же как существует два типа электрических зарядов, которые воздействуют друг на друга электростатическими силами, существует и два вида магнитных полюсов, которые действуют друг на друга магнитными силами. Слово “полюс” пригодится нам, чтобы отличать магнетизм от электричества: полюсы — магнитные, а заряды — электрические\*.

\* Электрические заряды реально существуют в природе, а магнитных полюсов не существует. Магнитное взаимодействие вызвано исключительно движением электрических зарядов или переменным электрическим полем. Но оно часто проявляется так, что нам кажется, будто некое тело (например, стрелка компаса) имеет на концах пару противоположных магнитных полюсов.

Два вида магнитных полюсов называются северным и южным, и по географической аналогии они полностью противоположны друг другу. Оба вида полюсов представляют собой две стороны одного физического понятия: магнитного полюса. Разумеется, вас не должно удивить, что одноименные полюсы отталкиваются, разноименные — притягиваются. Далее, при увеличении расстояния между полюсами магнитостатические силы между ними ослабевают. Эти силы обратно пропорциональны квадрату расстояния между полюсами. Как видите, до сих пор между электричеством и магнетизмом обнаруживается поразительное сходство.

Тем не менее мы подошли к коренному различию между электричеством и магнетизмом: в то время как элементарные частицы, которые несут исключительно положительный или отрицательный электрический заряд, широко известны, частицы, которые имели бы только северный или только южный магнитные полюсы, пока что не были найдены. Возможно, эти гипотетические элементарные магнитные частицы (их назвали магнитными монополями) вообще не существуют в нашей Вселенной\*. Это “космическое упущение” объясняет, почему не существует магнитной искры: раз нет монополя, то нет и магнитного эквивалента электрического заряда, который мог бы перемещаться из одного места в другое в виде “магнитного тока”, не говоря уже о “магнитных искрах”.

Но пусть в природе нет изолированных магнитных полюсов, зато существуют их пары. Эти пары состоят из равных по величине северного и южного полюсов, пространственно отделенных друг от друга. Такую систему называют магнитным диполем. Так как эти два противоположных полюса имеют равные величины, они в сумме дают нуль и суммарный магнитный полюс магнитного диполя равен нулю.

Простой магнит-“пуговица” имеет как северный, так и южный полюс, располагающиеся, как правило, на противоположных сторонах “пуговицы” (рис. 11.1.1, а). Не бывает “полностью северных” или “полностью южных” магнитов. И, что самое удивительное, даже если вы разрежете магнитную “пуговицу” пополам, это не позволит отделить северный полюс от южного (рис. 11.1.1, б). Вместо этого на срезах появятся новые полюсы, и каждая половинка исходного магнита в итоге превратится в отдельный магнит с суммарным нулевым полюсом! Если вы разрежете магнитную кнопку не вдоль, а поперек (рис. 11.1.1, в), то все равно получите два новых магнита с нулевым полюсом в сумме у каждого.

Теперь мы можем объяснить, почему два магнита иногда притягиваются, а иногда отталкиваются. Имея два полюса на каждом магните, мы должны учесть четыре взаимодействия: два отталкивания между одноименными полюсами (север-север и юг-юг) и два притяжения между разноименными полюсами (север-юг и юг-север). Может показаться, что все эти силы должны уравновешивать друг друга, однако расстояния между полюсами и, следовательно, силы взаимодействия между ними зависят от расположения магнитов. Поэтому преобладают силы, действующие между более близкими полюсами.

Если повернуть магниты одноименными полюсами друг к другу, они будут отталкиваться (рис. 11.1.2, а). Если повернуть их разноименными полюсами друг к другу — притягиваться (рис. 11.1.2, б). И если расположить магниты под углом, на них будут действовать моменты, которые будут стремиться повернуть друг к другу разноименные полюсы и отвернуть одноименные.

\* Физики постоянно ведут поиски магнитных монополей на Земле и их проявлений в космосе. Результат пока отрицательный, но теоретики давно предсказали некоторые свойства магнитных зарядов, если они все-таки существуют. Лауреат Нобелевской премии Поль Дирак в 1931 г. нашел, какой должна быть минимальная величина магнитного заряда, поэтому магнитный монополю часто называют монополем Дирака. В 1974 г. А. М. Поляков и Герард т Хоофт показали, что в некотором классе гипотетических физических теорий существование монополей необходимо, что усилило интерес к их поиску.

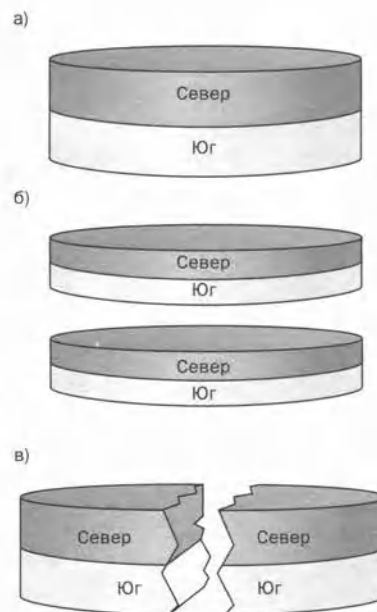


Рис. 11.1.1. (а) На одной стороне обычного кнопочного магнита расположен северный полюс, на другой — южный. Суммарный магнитный полюс равен нулю. Разрезав магнит вдоль (б) или поперек (в), вы все равно получите два новых магнита, с суммарным нулевым полюсом у каждого.

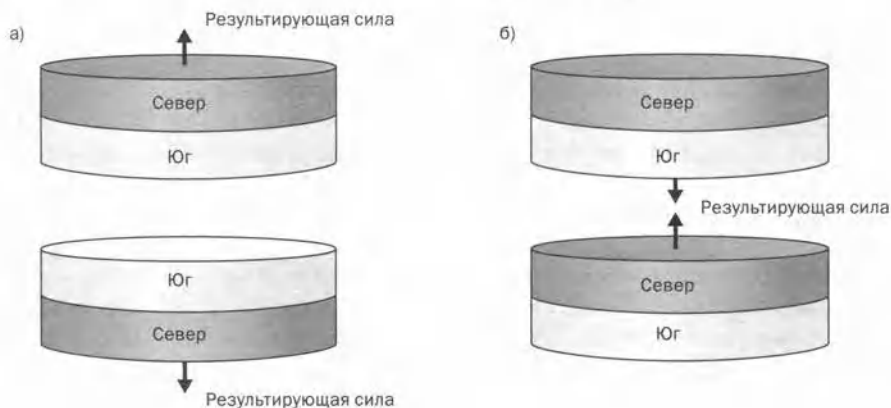


Рис. 11.1.2. (а) Когда магниты повернуты друг к другу одноименными полюсами, они отталкиваются; когда разноименными (б) — притягиваются.

Чтобы разобраться в магнетизме (учитывая, что мы пока не нашли монополь), нам понадобится некоторое воображение. Начнем с единиц измерения. Пусть мы не можем получить единицу отдельно для “чистого” северного полюса, т. е. магнитного заряда, но мы можем дать определение этой единице и попытаться понять ее поведение. В системе СИ единица магнитного полюса — ампер-метр (сокращенно А·м). Это удивительный выбор: единица электричества выступает как единица магнетизма, намекая таким образом на глубокую взаимосвязь электричества и магнетизма, с чем мы скоро и столкнемся.

Подобно тому, как существует закон Кулона для электрических зарядов, есть и свой закон Кулона для магнитных полюсов. Эксперименты Кулона с магнитами (осложненные тем, что он должен был работать с магнитными диполями, а не отдельными полюсами) показали, что сила взаимодействия между магнитными полюсами пропорциональна количеству каждого полюса и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними. Точное соотношение можно записать в виде:

$$\text{сила} = \frac{\text{магнитная постоянная} \times \text{магнитный заряд полюса}_1 \times \text{магнитный заряд полюса}_2}{4\pi \times (\text{расстояние между полюсами})^2} \quad (11.1.1).$$

Сила, действующая на полюс<sub>1</sub>, направлена в сторону полюса<sub>2</sub> или от него; сила, действующая на полюс<sub>2</sub>, направлена в сторону полюса<sub>1</sub> или от него. Магнитная постоянная, или магнитная проницаемость вакуума, равна  $4\pi \times 10^{-7} \text{ Н/А}^2$ . В соответствии с третьим законом Ньютона, сила, действующая на полюс<sub>1</sub> со стороны полюса<sub>2</sub>, равна по величине, но направлена противоположно силе, с которой полюс<sub>1</sub> действует на полюс<sub>2</sub>.

### Закон Кулона для магнетизма

Величина магнитостатической силы, действующей между двумя магнитными полюсами, равна магнитной постоянной, умноженной на произведение магнитных зарядов полюсов и деленной на произведение  $4\pi$  на квадрат расстояния между полюсами. В случае разноименных полюсов это силы притяжения, в случае одноименных — отталкивания.

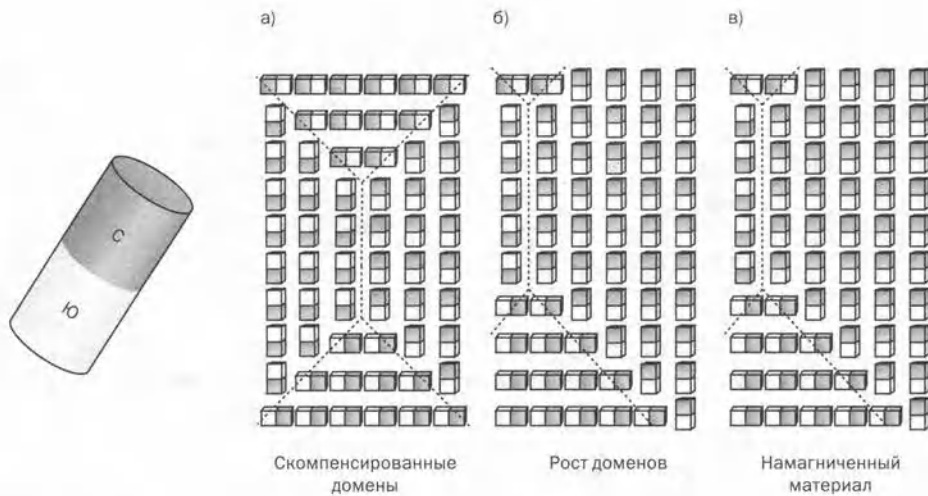
## Холодильник: железо и сталь

Две магнитные “пуговицы” могут притягиваться или отталкиваться, но что, если у вас есть только один магнетик? В таком случае самый простой способ для наблюдения магнитных сил — поместить этот магнит вблизи холодильника или любого предмета, сделанного из железа или стали. Магнит притянется к холодильнику. Но если вы перевернете кнопку обратной стороной, ожидая, что теперь она будет отталкиваться от холодильника, вас ждет разочарование. Несмотря на то что холодильник явно обладает магнитными свойствами, его магнетизм почему-то проявляется таким образом, что магнит-“пуговица” всегда притягивается к холодильнику.

На самом деле поведение холодильника не так уж загадочно. Сталь, из которой он изготовлен, состоит из бесчисленных микроскопических магнитов, каждый из которых имеет северный и южный полюсы (рис. 11.1.3). Обычно эти отдельные магнитные диполи ориентированы полуслучайным образом (рис. 11.1.3, а), поэтому холодильник в целом не проявляет магнитных свойств. Однако когда вы подносите к холодильнику один из полюсов магнитной “пуговицы”, его крошечные магнетики меняют размер, форму и ориентацию\* (рис. 11.1.3, б). В результате противоположные полюсы придвигаются ближе к полюсу “пуговицы”, а одноименные полюсы отодвигаются от ее полюса. В толще стали происходит магнитная поляризация, и в результате магнитная “пуговица” все равно притягивается к холодильнику.

Эта поляризация остается сильной лишь до тех пор, пока полюс магнитной кнопки находится неподалеку. Когда вы снимаете магнит, большая часть из микроскопических магнитов в стали возвращается к своей полуслучайной ориентации. Магнитная поляризация стали резко уменьшается или вообще исчезает. Когда затем вы подносите кнопку магнита к холодильнику другой стороной, то есть другим полюсом, в стали развивается противоположная магнитная поляризация и кнопка снова притягивается. Неважно, какой полюс или полюсы вы подносите к холодильнику, сталь все равно будет поляризоваться так, чтобы притянуть эти полюсы.

\* В качестве крошечных магнетиков лучше всего рассматривать отдельные молекулы железа. Во внешнем магнитном поле они не меняют ни размеры, ни форму, но меняют ориентацию своих магнитных диполей. Соседние молекулы стали имеют совпадающие или близкие ориентации магнитного дипольного момента, поэтому их можно объединить в существенно большие по размеру группы, которые называются доменами. Молекулы стали, входящие в один домен, имеют одинаковую ориентацию магнитного диполя, поэтому весь диполь можно рассматривать как единый магнетик. Во внешнем магнитном поле меняют размер, форму и ориентацию именно домены. Магнитные домены имеются только у веществ, которые называются ферромагнетиками, антиферромагнетиками или ферримагнетиками.



**Рис. 11.1.3.** (а) Бесчисленные микроскопические магниты, имеющиеся в стали или железе, в обычном состоянии ориентированы случайным образом. (б) Однако когда поблизости появляется сильный магнитный полюс, эти мельчайшие магниты переориентируются, чтобы притянуть его. В мягких магнитных материалах переориентация носит временный характер. (в) Твердые магнитные материалы остаются намагниченными еще долгое время после удаления внешнего полюса.

Если вы попытаете повторить этот фокус с пластиковой или алюминиевой поверхностью, магнитик к ним не пристанет. Что же такого особенного в стали, что позволяет ей развивать настолько сильную магнитную поляризацию? Ответ на этот вопрос заключается в том, что обычная сталь, а точнее, ее главный компонент — железо, является ферромагнитным веществом, обладающим активными и безусловными магнитными свойствами на атомных уровнях.

Чтобы понять природу ферромагнетизма, нам нужно начать с атомов и элементарных частиц, из которых они построены: электронов, протонов и нейтронов. По ряду причин все эти частицы, в частности электроны, имеют магнитные диполи, и атомы, которые из них образуются, часто проявляют магнетизм. Несмотря на стремление элементарных частиц образовывать противоположно ориентированные пары, чтобы их магнитные диполи уравнивали друг друга, большинство изолированных атомов имеют значительные магнитные диполи.

Но, несмотря на то что атомы в основном по своей природе магнитны, большинство материалов не являются магнитами. Дело в том, что когда атомы соединяются, чтобы образовать вещество, происходит очередной этап создания пар и взаимной нейтрализации диполей. В большинстве случаев этот процесс проходит настолько эффективно, что полностью исключает магнетизм на атомном уровне. Такие материалы, как стекло, пластик, кожа или медь, на атомном уровне вообще не сохраняют магнетизма, и ваш магнит не прилипнет к ним, как ни старайтесь. Даже большинство нержавеющей сталей не являются магнитными.

Тем не менее есть несколько веществ, которые избегают этой потери магнитных свойств и, таким образом, остаются магнитными на атомном уровне. Наиболее важными из них являются ферромагнетики — класс магнитных материалов, в который входят обычная сталь и железо. Если вы исследуете небольшой участок ферромагнитной стали, то увидите, что она состоит из множества микроскопических образований, или магнитных доменов, которые являются естественными магнитами и не могут быть размагничены (**рис. 11.1.3, а**). В пределах одного домена на атомном уровне все магнитные диполи выстраиваются параллельно и вместе образуют значительный магнитный диполь.

Поскольку в стали всегда есть магнитные домены, в результате магнитного взаимодействия близлежащие домены ориентируются относительно друг друга таким образом, что их магнитные диполи компенсируют друг друга. Микроскопические магниты так хорошо уравнивают друг друга, что сталь кажется немагнитной. Жаль, что это так; если бы дело обстояло иначе, посещение обычного магазина инструментов было бы поистине захватывающим приключением.

Но когда вы подносите к стали сильный магнит (**рис. 11.1.3, б**), отдельные домены в зависимости от их магнитной ориентации растут или уменьшаются, и сталь намагничивается (**рис. 11.1.3, в**). При этом сами по себе атомы не двигаются, процесс сводится к переориентации магнитных диполей. Домены, которые притягивают полюс магнита, растут, те домены, которые отталкивают его, уменьшаются, и в результате магнитная «пуговица» прилипает к холодильнику.

Когда вы снимаете с холодильника магнитную “пуговицу”, сталь возвращается в исходное немагнитное состояние — она размагничивается. Ну или почти размагничивается. Процесс размагничивания идет не до конца, потому что некоторые домены остаются в прежнем состоянии. В то время как магнитные силы внутри стали способствуют полному возвращению к кажущейся немагнитности, химические силы могут затруднить рост или уменьшение доменов. Прилегающие области разделены доменными стенками — пограничными поверхностями между разными направлениями магнитной ориентации. Если домены меняют размер, доменные стенки должны двигаться. Тем не менее дефекты и примеси в стали могут взаимодействовать с доменной стенкой и препятствовать ее передвижению. Когда это происходит, сталь не в состоянии полностью размагнититься (рис. 11.1.4). Чтобы удалить из стали остаточный магнетизм, нужно помочь движению доменных стенок, как правило, с помощью нагревания стального предмета или механического удара по нему.

А вот мягкие магнитные материалы после удаления всех близлежащих полюсов без труда размагничиваются. Химически чистое железо, в котором почти нет дефектов и примесей, относится к мягким магнитным (или магнитомягким) материалам, которые с легкостью намагничиваются и размагничиваются. Твердыми (или жесткими) магнитными материалами называют такие, которые не так легко размагничиваются. Эти материалы склонны сохранять установившуюся при последнем намагничивании доменную структуру (рис. 11.1.3, в). Наша магнитная “пуговица” изготовлена из магнитотвердого материала.

Подобно стали, материал магнитной “пуговицы” относится к ферромагнетикам (или их аналогам). Но в отличие от стали, домены в нашем магнитике растут и уменьшаются не так легко. В процессе изготовления магнит подвергается такому сильному магнитному воздействию, что его домены перестраиваются и создают в “пуговице” постоянные магнитные полюсы. Теперь у нее есть северный полюс на одной стороне и южный — на другой. Если не подвергать “пуговицу”

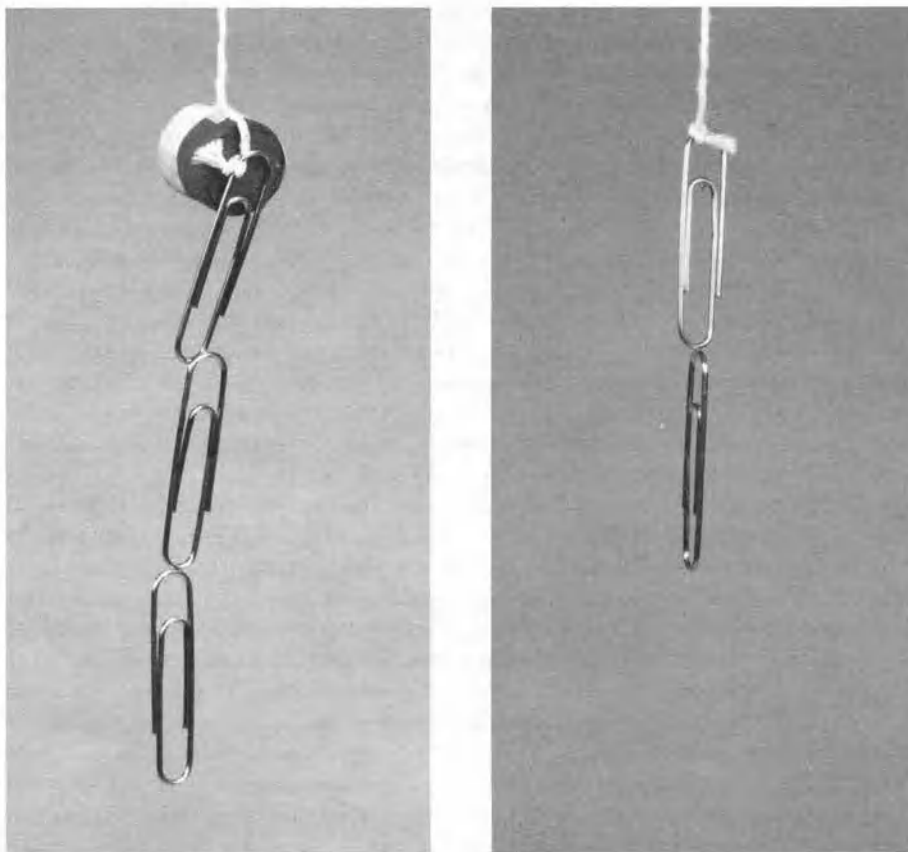


Рис. 11.1.4.

(а) Несмотря на то что эти канцелярские скрепки изначально не были намагничены, с помощью полюса сильного магнита удалось намагнитить их в виде цепочки.  
(б) После удаления магнита скрепки остаются частично намагниченными.



чрезвычайно сильным магнитным воздействием, нагреванию или удару, она способна хранить намагниченность почти до бесконечности. В этом отношении она становится постоянным магнитом.

Но не все постоянные магниты устроены так просто, как магнитная “пуговица”. В зависимости от способа намагничивания северный и южный полюсы могут находиться в самых неожиданных местах, а некоторые магниты могут даже иметь не одну пару полюсов\*. Хороший пример многополюсных магнитов — гибкие пластиковые магниты: каждый из них имеет повторяющийся узор из противоположных полюсов. Узоры различаются, но в большинстве из них полюсы образуют чередующиеся параллельные полосы. Вы можете проявить эти полосы, предоставив им возможность поляризовать и притянуть железный порошок (рис. 11.1.5) или накладывая друг на друга и двигая два одинаковых магнитных листа. Листы будут сильнее всего прилипать друг к другу, когда разноименные полюсы будут расположены напротив друг друга. А когда рядом окажутся одноименные полюсы, листы будут отталкиваться.

Способность твердого магнитного материала “запоминать” намагниченность можно использовать для сохранения информации. После намагничивания определенным образом — то есть запоминания определенной информации — материал будет сохранять свою намагниченность и связанную с ней информацию, пока не подвергнется следующему магнитному воздействию. Сохранение информации на твердых магнитных материалах лежит в основе большинства технологий магнитной записи и хранения, в том числе магнитных полос на кредитных картах, магнитных лент, компьютерных дисков и магнитной памяти с произвольным доступом (MRAM, или магниторезистивной оперативной памяти) (рис. 11.1.6).

## Компасы

Если вы когда-нибудь ходили в поход, то, возможно, у вас есть компас. Как и магнитная “пуговица”, стрелка этого компаса представляет собой простой постоянный магнит с одним северным магнитным полюсом и одним южным. Стрелка компаса помогает не заблудиться, потому что Земля сама по себе имеет магнитный диполь, который влияет на ориентацию стрелки: северный магнитный полюс планеты указывает на север.

Уже сейчас мы можем сказать, что должно располагаться в районе географического Северного полюса Земли: южный магнитный полюс. Притяжение от этого южного магнитного полюса заставляет стрелку повернуться северным магнитным полюсом к северу... Хотя на самом деле все гораздо сложнее. Начнем с того, что магнитные полюсы Земли находятся глубоко под поверхностью и не совсем совпадают с географическими полюсами. Что еще хуже, магнитоактивные материалы, которые присутствуют повсюду в окружающей среде — от далеких гор до близлежащих зданий, также влияют на стрелку компаса.

В результате стрелка реагирует на влияние бесчисленных магнитных полюсов, как ближних, так и дальних. Понимая, как трудно было учесть все эти влияния по отдельности, мы лучше будем считать, что стрелка компаса взаимодействует с чем-то одним — с магнитным полем. Магнитное поле — это свойство пространства, которое действует на полюс магнитостатической силой. В соответствии с этой новой концепцией, стрелка компаса реагирует на локальное магнитное поле — поле, которое создается всеми окружающими магнитными полюсами.

Как и в случае с электрическим полем, кажется, что магнитное поле служит всего лишь посредником: различные полюсы создают магнитное поле, и это магнитное поле влияет на стрелку компаса. Но, как мы увидим, магнитное поле — это больше чем просто посредник, и оно — вовсе не выдумка ученых. Оно вполне реально и может существовать в пространстве независимо от создающих его полюсов. Так же как электрическое поле может создаваться не только зарядами, так и магнитное поле может создаваться не только полюсами.

Количественно магнитное поле характеризуется магнитной индукцией. Индукция магнитного поля в данной точке равна магнитостатической силе, с которой магнитное поле действовало бы на магнитный заряд северного полюса, равный единице, если бы он был помещен в этой точке. Если говорить более точно,



Рис. 11.1.5. Железный порошок образует мостики между магнитными полюсами пластикового магнитного листа.



Рис. 11.1.6. Железный порошок показывает расположение магнитных полюсов на магнитной полосе кредитной карты. Порошок налипает между каждой парой разноименных полюсов. Информация хранится в местах расположения полюсов.

\* Полюсы магнита не обязаны быть парными. Число полюсов постоянного магнита должно быть не меньше двух, но магнит может иметь и три полюса. Такой магнит можно получить, соединив вместе северные полюсы двух одинаковых полосовых магнитов (“магнитов-брусков”). Такой составной магнит будет иметь северный полюс в центре и два южных по краям.

магнитоэлектрическая сила равна произведению магнитного заряда, умноженному на индукцию магнитного поля, и направлена в ту же сторону, что и магнитное поле. Мы можем записать это отношение в виде:

$$\text{сила} = \text{магнитный заряд} \times \text{магнитная индукция} \quad (11.1.2),$$

где направление силы совпадает с направлением магнитного поля, то есть с направлением вектора магнитной индукции.

Следует отметить, что на отрицательное количество магнитного заряда (южный полюс) действует сила, направленная противоположно магнитному полю. В системе СИ магнитная индукция измеряется в теслах;  $Tл = Н \cdot А^{-1} \cdot м^{-1}$ .

Магнитное поле Земли является относительно слабым, около  $0,00005 Tл$  в северном направлении (для сравнения, индукция магнитного поля рядом с магнитиком-“пуговицей” может составлять  $0,1 Tл$  или более). Поле Земли действует на северный полюс стрелки компаса, чтобы северный конец стрелки указывал на север, на южный — чтобы южный конец стрелки указывал на юг (рис. 11.1.7). Пока стрелка компаса не совпадает с этим полем, она испытывает крутящий момент и приобретает угловое ускорение. Поскольку устройство компаса таково, что стрелка может вращаться только горизонтально, испытывая при этом слабое трение, стрелка вскоре останавливается, указывая своим северным полюсом примерно на север. Если бы устройство позволяло стрелке вращаться также и вертикально, то северный полюс стрелки в Северном полушарии указывал бы вниз, а в Южном полушарии — вверх. В целом можно сказать, что, поворачиваясь так, чтобы ее направление совпадало с направлением локального магнитного поля, стрелка минимизирует свою магнитоэлектрическую потенциальную энергию. Несколько раз качнувшись туда-сюда, стрелка компаса достигает устойчивого равновесия и устанавливается вдоль направления локального магнитного поля, которое, как можно надеяться, направлено на север.

Поскольку магнитное поле Земли в непосредственной близости от компаса однородно, его действие на северный полюс стрелки точно компенсирует действие на южный и действующая на стрелку результирующая сила равна нулю. Но если вы поднесете компас к магниту, то локальное магнитное поле уже не будет однородным. Вблизи одного из полюсов магнитной кнопки магнитное поле станет сильнее, и на стрелку будет действовать результирующая сила, направленная к полюсу или от полюса, в зависимости от их расположения.

Когда направление стрелки совпадает с направлением неоднородного поля (то есть ее северный полюс указывает туда же, куда направлено локальное поле), силы, действующие на противоположные полюсы стрелки, не будут уравновешены и результирующая сила будет направлена в сторону увеличения магнитной индукции. Если стрелка направлена в сторону, противоположную направлению поля, то результирующая сила будет направлена в сторону уменьшения магнитной индукции. На практике это означает, что, когда вы подносите компас к магнитной “пуговице”, стрелка компаса сначала поворачивается, чтобы встать вдоль направления локального поля, а затем ее тянет в сторону увеличения поля, к ближайшему полюсу “пуговицы”. То же самое происходит, когда вы подносите друг к другу две магнитные “пуговицы”: каждая поворачивается в соответствии с направлением магнитного поля другой, а затем они буквально прыгают друг на друга. Берегите пальцы!

Подобным же образом ведет себя стальной брусок, когда вы держите его возле магнита: сталь намагничивается вдоль направления локального магнитного поля, а затем ее притягивает в сторону увеличения поля, к ближайшему полюсу магнетика. Именно так “пуговица” удерживает ваши записки на холодильнике!

## Железные опилки и линии магнитной индукции

Магнитные поля кажутся совершенной абстракцией. Как было бы хорошо, если бы их можно было увидеть... Как ни странно, это возможно: достаточно посыпать поле железными опилками! Вам понадобится подложка из бумаги или жидкости, зато вы сможете увидеть интереснейшую модель. Подобно крошечным стрелкам компаса, частицы железа намагничиваются и выстраиваются вдоль локального

Магнитное поле Земли

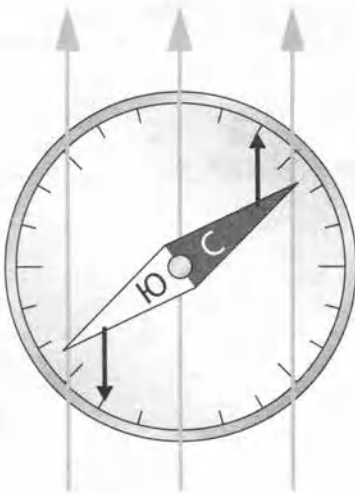


Рис. 11.1.7. Стрелка компаса располагается вдоль локального магнитного поля. На ее северный полюс действует магнитоэлектрическая сила, направленная так же, как и поле, на южный полюс стрелки действует противоположно направленная сила.

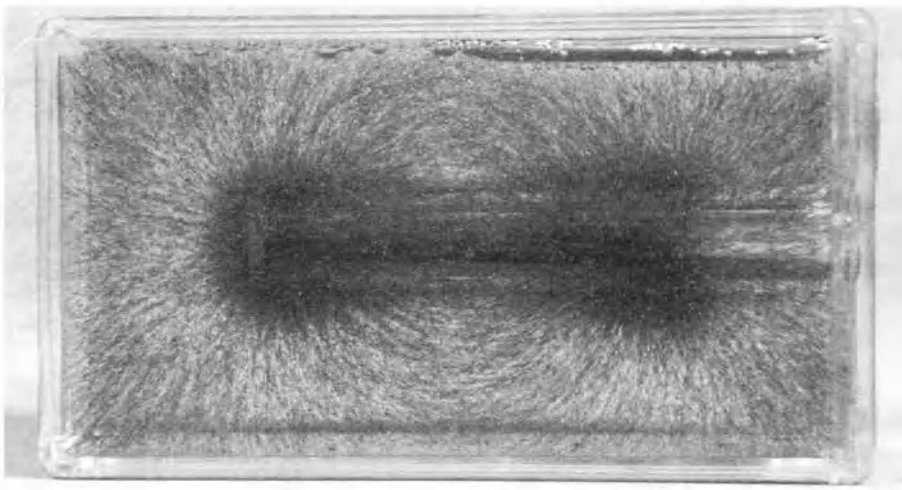


Рис. 11.1.8. Железный порошок показывает линии магнитной индукции, образующиеся вокруг небольшого магнитного бруска.

магнитного поля. Северный и южный полюсы соединяются длинными линиями (рис. 11.1.8), которые показывают очертания магнитного поля!

Эти линии создают захватывающую и информативную карту поля. Во-первых, в каждой точке линии частицы показывают направление локального магнитного поля. Во-вторых, линии гуще всего там, где локальное магнитное поле самое сильное. Другими словами, направление линий совпадает с направлением локального магнитного поля, а их густота пропорциональна магнитной индукции локального поля. Линии, которые сейчас обозначены опилками, настолько важны, что имеют собственное название: линии магнитной индукции. Еще их называют силовыми линиями магнитного поля и линиями магнитного потока.

Эти линии очень полезны при изучении магнитного поля. Если вы исследуете магнитное поле на большой площади, то, скорее всего, использовать железные опилки будет не слишком удобно. Лучше взять в руку компас и идти в направлении, которое указывает его стрелка, то есть в направлении магнитного поля. Путь, по которому вы идете, следуя компасу, и есть линия магнитной индукции. Если вы совершите такие же прогулки из разных точек, вы изучите все магнитное поле, одну линию за другой. Так как магнитное поле обычно направлено от северного полюса к южному, то и ваш маршрут, как правило, будет пролегать от северных полюсов к южным. Собственно говоря, у наших постоянных магнитов каждая линия магнитной индукции начинается на северном полюсе и заканчивается на южном\*.

Последнее наблюдение носит общий характер: линии магнитной индукции не начинаются и не кончаются нигде, кроме магнитных полюсов. Таким образом, линии магнитной индукции расходятся во всех направлениях от северного полюса и сходятся со всех сторон на южном полюсе, вот и все; у линий магнитной индукции нет ни начала, ни конца, кроме как на полюсах — они всегда замкнутые. Если идти по линии магнитной индукции с компасом, то либо вы дойдете до южного полюса, либо будете идти вечно!

Перспектива такой бесконечной прогулки ставит в тупик: если линия магнитной индукции, вдоль которой вы следуете, не заканчивается на полюсе, то что же создало это магнитное поле? Ответ приоткрывает завесу над глубинной связью между магнетизмом и электричеством: некоторые магнитные поля создаются не магнитными полюсами — они создаются электричеством! Чтобы увидеть, как это происходит, давайте рассмотрим другой распространенный бытовой магнит: электромагнит обычного дверного звонка.

## Электрические дверные звонки и электромагниты

Классический электрический дверной звонок с помощью магнита и пружины заставляет железный стержень ударять по двум колокольчикам: “динь-дон”. Нажимая на кнопку, вы замыкаете электрическую цепь, и возникающий в результате этого электрический ток путем магнитного воздействия толкает железный боек, который ударяет в первый колокольчик. Раздается первый тон: “динь”. Отпуская

\* Напомним, что на самом деле никаких магнитных полюсов в природе не существует, то есть в реальности все линии магнитной индукции не имеют ни начала, ни конца. Как правило, они замкнуты, но встречаются и более сложные варианты, когда они заполняют некоторую область пространства, никогда не возвращаясь в исходную точку. Естественно, что концы магнитных силовых линий могут находиться бесконечно далеко от нас.

❶ Французский физик Андре-Мари Ампер (1775–1836) был самоучкой. Его отца казнили во время Великой французской революции. В 1796 г. Ампер стал учителем естествознания, затем служил профессором физики или математики в нескольких городах, прежде чем в 1804 г. остановил свой выбор на Парижском университете. В 1820 г. он узнал об опытах Эрстеда, продемонстрировавших, что электрический ток вызывает отклонение стрелки компаса, и всего неделей позже опубликовал статью, в которой детально обсуждал вопрос. Несомненно, он уже очень давно размышлял на эту тему.



Рис. 11.1.9. Железный порошок демонстрирует, что линии магнитной индукции около проводника, по которому течет ток, образуют вокруг проводника концентрические окружности.

кнопку, вы замыкаете цепь, останавливаете ток, прекращаете его магнитное воздействие, и пружина толкает боек назад, ко второму колокольчику: “дон”.

Самое главное здесь для нас то, что электрический ток может создавать магнитные силы. Строго говоря, у него просто нет выбора: электрические токи обладают магнитными свойствами.

### Связь между электричеством и магнетизмом — 1

Движущийся электрический заряд создает магнитное поле.

Представьте себе удивление, которое испытал датский физик Ганс Христиан Эрстед (1777–1851), когда в 1820 году он увидел, как ток, текущий по проводам, заставил вращаться стрелку находившегося рядом компаса. До этого момента электричество и магнетизм считались несвязанными явлениями. Вдохновленный опытами Эрстеда, французский физик Андре-Мари Ампер (см. ❶) в течение семи лет изучал связь между электричеством и магнетизмом, положив начало научной революции, которая в конечном итоге объединила эти понятия в рамках единой всеобъемлющей теории.

Если мы попробуем с помощью железных опилок проявить линии магнитной индукции вокруг длинного прямого проводника, по которому течет ток, нас ждет сюрприз (рис. 11.1.9). Линии магнитной индукции окружают провод системы концентрических окружностей, причем расстояние между двумя соседними окружностями тем больше, чем дальше от проводника. Проводник является электромагнитом — так называют устройства, которые становятся магнитными, когда через них течет электрический ток. Но так как электромагнит не имеет истинных магнитных полюсов, линии магнитной индукции не могут пролегать от северного полюса до южного. Вместо этого каждая линия магнитной индукции представляет собой замкнутый контур. Так что если вы, следуя указаниям компаса, отправитесь вдоль одной из этих линий, вы будете снова и снова ходить по кругу.

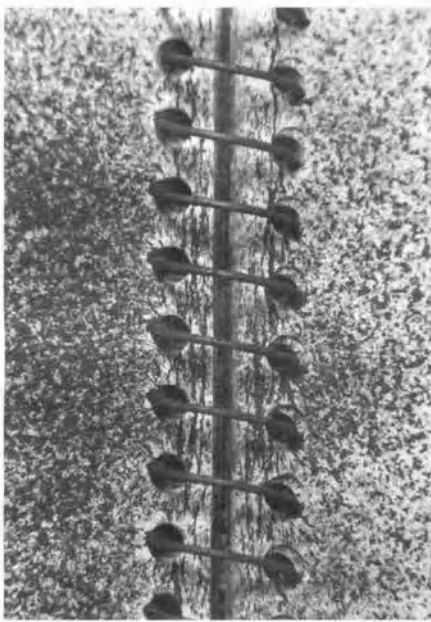
Поскольку густота линий магнитной индукции выше всего возле поверхности проводника, значит, там самое сильное магнитное поле. Помня о том, что железо притягивается в сторону увеличения магнитного поля, мы убеждаемся, что проводник притягивает железо, когда по нему течет ток.

Вообще-то, магнитное поле вокруг проводника с током относительно слабое, поэтому, чтобы его сконцентрировать и усилить, в дверном звонке провод свивают в катушку. Магнитное поле вокруг катушки с током имеет сложную структуру, но мы можем снова использовать железные опилки, чтобы сделать его видимым (рис. 11.1.10). Примечательно, что линии магнитной индукции снаружи катушки напоминают линии вокруг магнитной “пуговицы” аналогичных размеров (рис. 11.1.11) — как если бы катушка имела северный полюс на одном конце и южный полюс на другом! Но поскольку никаких истинных полюсов нет, линии магнитной индукции не имеют конца. Вместо этого они проходят через середину катушки и образуют замкнутый контур.

При протекании тока через катушку расположенный рядом железный объект (например, частица опилок) намагничивается вдоль локального магнитного поля, а затем движется в сторону увеличения поля — к густым линиям магнитной индукции в конце катушки. Но зачем останавливаться на этом? Поскольку силовые линии уходят в середину катушки, где они становятся еще гуще, железная частица будет втягиваться в середину катушки!

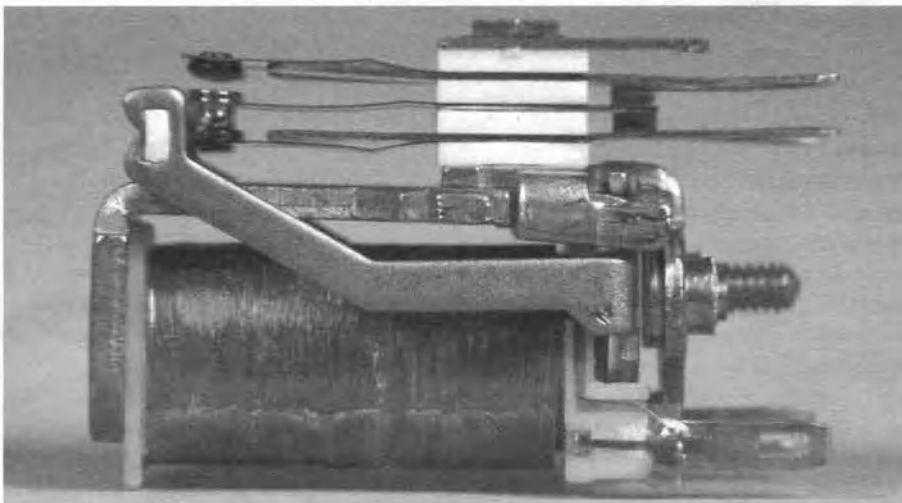
По такому же принципу работает и дверной звонок. Когда вы нажимаете на кнопку звонка, через катушку начинает течь ток и возникающее в результате этого магнитное поле втягивает железный стержень-сердечник в середину катушки. Сердечник достигает центра, и его боек ударяет по первому колокольчику. Когда после этого вы отпускаете кнопку, останавливая ток, магнитное поле исчезает, пружина выталкивает железный стержень обратно из катушки, и он ударяет по второму колокольчику. Эти два колокольчика и издадут так хорошо знакомое нам “динь-дон”!

Пока через катушку течет ток и пока железный сердечник находится внутри нее, эти два объекта действуют как единый мощный электромагнит. Магнитное поле, окружающее их, складывается из относительно скромного магнитного поля

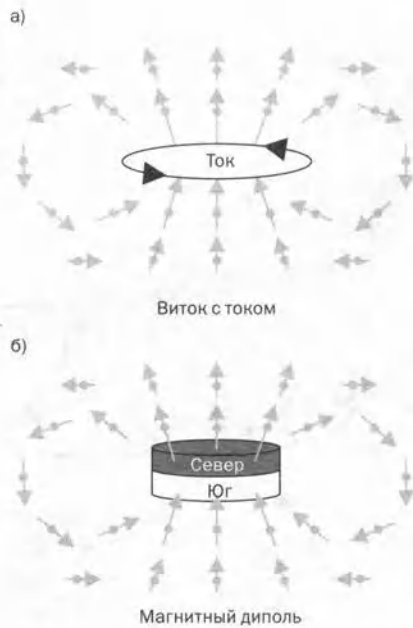


**Рис. 11.1.10.** Железный порошок показывает, что линии магнитной индукции проходят через середину катушки с током и замыкаются снаружи, так же как линии магнитной индукции вокруг магнита похожей формы. На всякий случай уточняем: на рисунке изображен блокнот на спирали, по которой пропущен электрический ток. Стальная проволока раскалилась почти докрасна и уже начала жечь бумагу!

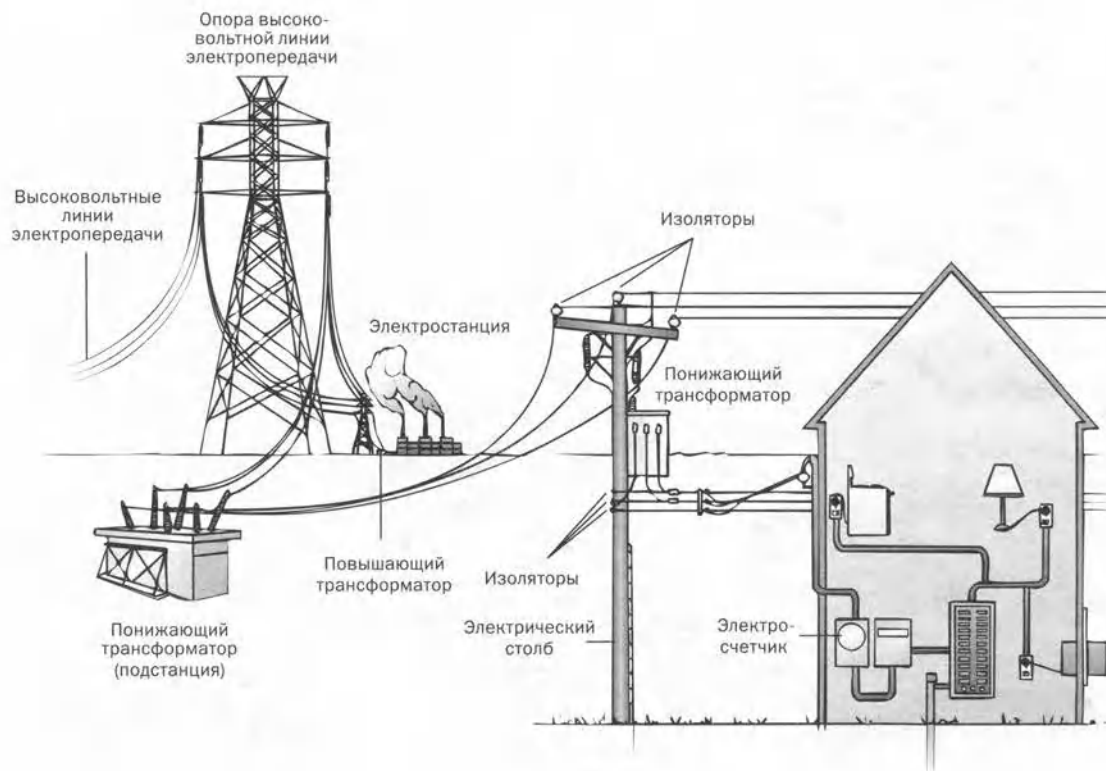
катушки и гораздо более сильного поля намагниченного железного сердечника. В сущности, ток в катушке намагничивает железо, и железный сердечник затем создает большую часть окружающего магнитного поля. Реальные электромагниты, которые управляют переключателями и клапанами в печах или кондиционерах и которые в состоянии подцепить и перенести в другое место кузов автомобиля на свалке металлолома, как правило, используют железо или похожие на него материалы, чтобы значительно усилить магнитное поле, создаваемое током в катушке (**рис. 11.1.12**).



**Рис. 11.1.12.** Этот электрический выключатель управляется электромагнитом и называется реле.



**Рис. 11.1.11.** (а) Магнитное поле вокруг петли с током направлено вверх через центр петли и вниз вокруг внешней части петли. Стрелка, проходящая через каждую точку, показывает величину и направление силы, которая будет действовать на северный полюс бесконечно малой магнитной стрелки, помещенной в эту точку. (б) Поле, создаваемое двухполюсным кнопочным магнитом, почти идентично полю витка с током.



## 11.2 Распределение электроэнергии

Электричество — необыкновенно полезная и удобная форма упорядоченной энергии. Поскольку его доставляют нам на дом вместе с другими коммунальными услугами, мы вспоминаем о нем, только когда приходит время оплатить счета. Провода, по которым приходит ток, никогда не засоряются, их не надо чистить, они работают постоянно и непрерывно — конечно, за исключением тех случаев, когда происходят аварии, перегорают предохранители или срабатывают автоматические выключатели.

Но как же электроэнергия добирается до нашего дома? В этом разделе мы узнаем, как ее передают на дальние расстояния от вырабатывающей ее электростанции и как она затем распределяется. Чтобы разобраться в сути проблемы, мы рассмотрим, каким образом провода влияют на электричество и как электроэнергия передается и переупорядочивается с помощью устройств, называемых трансформаторами.

### **Внимание!**

**Электричество опасно, особенно когда речь идет о высоких напряжениях.**

Главная опасность возникает в случае, если электрический ток проходит через тело в непосредственной близости от сердца и может нарушить его нормальный ритм. Для серьезного ущерба достаточно совсем небольшой силы тока. Человеческая кожа — настолько слабый проводник, что в обычных условиях предохраняет нас от опасных токов. Тем не менее при большом напряжении эти токи могут пройти сквозь кожу и поставить вашу жизнь под угрозу.

Как правило, чтобы получить электрический удар, наше тело должно стать частью замкнутого контура, но не полагайтесь на то, что вы не видите поблизости ничего, что могло бы служить таким контуром, — электрическая цепь может образоваться совершенно неожиданно для вас, едва вы коснетесь электропровода. Будьте особенно осторожны, находясь рядом с источником напряжения более 50 В, даже если речь идет об обычных аккумуляторах. Опасность возрастает, если у вас влажная или поврежденная кожа.

Батарейки очень хороши для питания фонариков, но не очень практичны как источник освещения для зданий. В свое время проводились эксперименты по установке аккумуляторов в подвалах, но их результаты разочаровали инженеров: батареи очень быстро истощались и слишком часто требовали обслуживания и пополнения запаса реагентов.

Более практичным источником электроэнергии стали угольные или дизельные электрические генераторы. Как и батареи, генераторы совершают работу над протекающим через них электрическим током и могут выработать электроэнергию, достаточную для освещения дома. Однако несмотря на то что производить энергию с помощью генератора дешевле, чем батареями, ранние генераторы были громоздкими машинами, которые требовали постоянного притока свежего воздуха и неусыпного внимания. Эти генераторы нужно было устанавливать централизованно, обеспечивать обслуживающим персоналом и снабжать дымоходами.

Именно такой подход выбрал американский изобретатель Томас Алва Эдисон (1847–1931) в 1882 году, когда начал электрификацию Нью-Йорка. Каждый из генераторов “Электрической компании Эдисона” действовал как механическая батарея, вырабатывавшая постоянный ток, который всегда выходил из генератора по одному проводу и возвращался в него по другому. Эдисон размещал генератор в центре квартала, и оттуда по медным проводам ток подавался в дома. Однако чем дальше от генератора, тем толще должны были быть медные провода: мы помним, что провод сопротивляется прохождению тока, а чем толще провод, тем легче ему проводить ток.

Толщина провода так важна, потому что, как и нить лампочки, которую мы изучали в предыдущей главе, провод имеет электрическое сопротивление. В соответствии с законом Ома (уравнение 10.3.4), напряжение на участке проводника равно его электрическому сопротивлению, умноженному на силу проходящего через него тока. Когда речь идет о проводе, по которому ток идет от генератора к дому, нас беспокоит прежде всего, какая часть энергии будет потеряна в виде тепла. Мы можем определить потерю энергии, объединив закон Ома с уравнением для энергии, потребляемой устройством (уравнение 10.3.1):

$$\begin{aligned} \text{потребленная энергия} &= \text{напряжение} \times \text{сила тока} = \\ &= (\text{сила тока} \times \text{электрическое сопротивление}) \times \text{сила тока} = \\ &= (\text{сила тока})^2 \times \text{электрическое сопротивление} \end{aligned} \quad (11.2.1).$$

Иными словами, потеря энергии пропорциональна квадрату силы тока, проходящего через проводник! Эдисон очень хорошо познакомился с этой зависимостью, когда попытался расширить свою систему распределения энергии. Чем больше тока он пытался передать по определенному проводнику, тем больше энергии терялось в виде тепла. Удвоение силы тока учетверяло потери.

Эдисон попытался бороться с потерями, снижая электрическое сопротивление проводов. Он использовал медь, потому что лучше, чем медь, проводит ток только серебро. Чтобы увеличить число движущихся зарядов, Эдисон увеличивал толщину проводов. Кроме того, он старался сделать провода как можно более короткими, чтобы меньше было возможностей терять энергию. Ограничения по длине проводов вынудили Эдисона строить генераторные установки непосредственно в городах, которые обслуживала его компания. Даже в Нью-Йорке было множество локальных энергостанций (еще о раннем периоде развития электроэнергетики см. ❶).

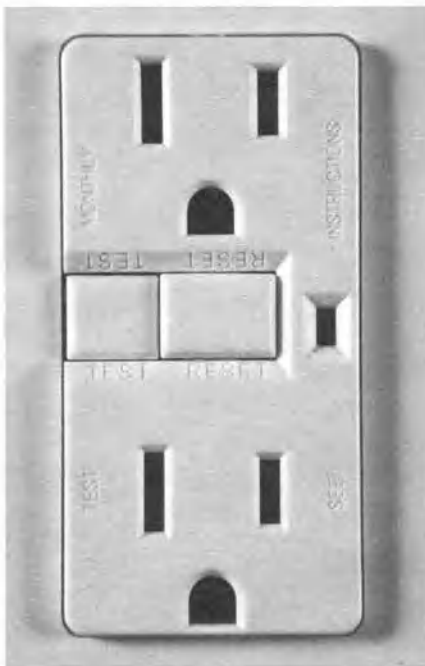
Эдисон также попробовал сократить потери, передавая ток меньшей силы при более высоком напряжении. Так как переданная энергия равна напряжению, умноженному на силу тока (см. уравнение 10.3.1), Эдисон мог понизить силу тока, увеличивая напряжение. И хотя через каждый дом проходил более слабый ток, благодаря повышению напряжения количество подаваемой энергии сохранялось прежним.

Однако высокое напряжение очень опасно, потому что, как правило, в этом случае при прохождении тока через воздух образуются искры — не говоря уже об электрическом шоке при прохождении тока через тело человека. И если линия высокого напряжения может быть безопасной под открытым небом, то обеспечить

❶ Лав-Канал — самая известная в США свалка токсичных отходов. Она была устроена в 1920-х гг. в заброшенном канале, который начал строить еще в 1892 г. предприниматель Уильям Лав. Он собирался соединить два рукава реки Ниагары, чтобы с помощью воды, текущей с большим перепадом высот, вырабатывать электроэнергию постоянного тока для жителей города Ниагара-Фоллс, штат Нью-Йорк. Изобретение системы электропередачи переменного тока в 1896 г. сделало канал ненужным, и он так никогда и не был достроен.



**Рис. 11.2.1.** Магнитный цилиндр парит над поверхностью сверхпроводника при температуре 78 К. Токи, свободно текущие по сверхпроводнику, наделяют его магнитными свойствами и заставляют его отталкивать магнитный цилиндр. Полное вытеснение линий магнитного поля из объема сверхпроводника называется эффектом Мейснера.



**Рис. 11.2.2.** Эта электрическая розетка соответствует стандартам США для сети переменного тока с напряжением 120 В и силой тока 15 А. Более длинные и широкие (слева) — нейтраль, более короткие (справа) — фазы, арочные отверстия по центру розетки — земля. Такая розетка обеспечивает защитное отключение (УЗО): если ток, выходящий из фазы, почему-либо не возвращается в нейтраль или наоборот, мгновенно размыкаются все контакты до перенастройки (кнопка *RESET*). Кнопка *TEST* имитирует утечку тока. Если защита работает правильно, то при нажатии на тестовую кнопку УЗО должно отключиться.

\* В странах бывшего СССР в розетках, как правило, есть только фаза и нейтраль.

безопасность такой линии внутри здания почти невозможно. Эдисон использовал самые высокие напряжения, какие только позволяли требования безопасности.

Несмотря на то, что со временем ученые обнаружили ряд материалов, которые при очень низких температурах теряют электрическое сопротивление и становятся идеальными проводниками или сверхпроводниками (**рис. 11.2.1**), эти сверхпроводники до сих пор экономически нецелесообразно применять для систем распределения электроэнергии. Поэтому их использование ограничено такими устройствами, как большие электромагниты и специализированные электронные приборы.

## Знакомьтесь: переменный ток

Истинная проблема распределения электроэнергии с помощью постоянного тока (ПсТ, *англ. DC*) заключается в том, что не существует простого способа передачи энергии от одной цепи постоянного тока другой. Поскольку генератор и лампочки должны быть частью одной цепи, безопасность требует, чтобы во всей цепи использовались низкое напряжение и большая сила тока. Поэтому в системах распределения, использующих постоянный ток, значительная часть энергии напрасно тратится в соединительных проводах.

Однако, как мы скоро увидим, переменный ток (ПрТ, *англ. AC*) позволяет легко передавать энергию от одной цепи переменного тока другой, так что разные элементы системы распределения электроэнергии с помощью переменного тока могут работать при различных напряжениях и токах. Важнее всего то, что провода, по которым энергия переносится на большие расстояния, являются частью высоковольтной цепи с низкими токами и, следовательно, теряют мало энергии.

Переменный ток отличается тем, что периодически меняет направление на противоположное. Например, у включенной в обычную сеть настольной лампы ток, который течет через ее нить, меняет свое направление много раз в секунду.

Переменный ток течет через нить накала лампы благодаря воздействию переменного напряжения — напряжения, которое периодически меняет направление. Как вы помните из раздела 10.3, ток в омических проводниках течет вдоль градиента потенциала от положительного к отрицательному — так же как велосипедисты катятся с вершины холма вниз вдоль градиента высоты. В то время как в фонарике батарейка подает на нить лампы постоянное напряжение и в результате по цепи течет постоянный ток, источник питания подает на нить вашей настольной лампы переменное напряжение и по цепи течет переменный ток.

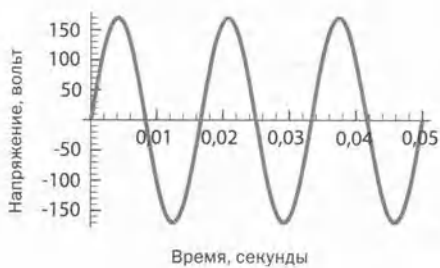
Переменное напряжение присутствует в любой электрической розетке. В Соединенных Штатах в обычной розетке есть три контакта: фазный, или просто «фаза»; нейтральный (или «ноль») и заземление, или просто «земля» (**рис. 11.2.2**)\*. В правильно установленной розетке абсолютный потенциал «ноля» поддерживается на уровне около 0 В (нуля вольт), в то время как абсолютные значения потенциала «фазы» колеблются, они то больше, то меньше 0 В. Абсолютное значение потенциала заземления, которое не является обязательным соединением и поддерживает безопасность и которое мы обсудим позже, также составляет примерно 0 В.

Один конец нити вашей лампы соединен с фазой, второй — с нейтралью. Поскольку ток всегда течет от высокого потенциала к низкому, он течет от фазы к нейтрали, когда фаза имеет положительный потенциал, и в обратном направлении, от нейтрали к фазе, когда фаза имеет отрицательный потенциал.

В обычной сети переменного тока потенциал фазы изменяется по синусоиде — то есть пропорционально изменению тригонометрической функции синуса в зависимости от времени (**рис. 11.2.3**). Плавно меняющееся напряжение пропускает через лампу так же плавно меняющийся ток. Перед каждым разворотом ток в нити постепенно замедляется до остановки перед тем, как набрать силу и пойти в противоположном направлении. В США напряжение переменного тока меняется на противоположное каждую 1/120 часть секунды, совершая таким образом в секунду 60 полных циклов (туда и обратно), то есть частота равна 60 Гц. В Европе развороты происходят 100 раз в секунду, поэтому напряжение переменного тока совершает 50 полных циклов каждую секунду и частота составляет 50 Гц.

К счастью, эти развороты практически не влияют на бытовые приборы. Лампы и тостеры (**рис. 11.2.4**) потребляют энергию благодаря своему электрическому





**Рис. 11.2.3.** Напряжение фазы в сети переменного тока США с номинальным напряжением 120 В меняется во времени по синусоидальному закону и совершает 60 полных циклов в секунду. Амплитудное значение составляет  $\pm 170$  В, эффективное среднее или действующее значение — 120 В. Напряжение нейтрали всегда близко к 0 В.

сопротивлению вне зависимости от того, в каком направлении через них идет ток. Более того, потребляемая мощность таких простых омических устройств используется для определения эффективного, или действующего, напряжения для сети переменного тока. Номинальное напряжение переменного тока в розетке, формально это его среднеквадратичное или, действующее, значение напряжения, определяется как напряжение постоянного тока, которое вызывает такое же среднее потребление мощности омическим устройством. Таким образом, напряжение 120 В сети переменного тока обеспечивает тостеру такое же среднее потребление мощности, как и 120 В сети постоянного тока.

Тем не менее развороты переменного тока не остаются без последствий. Во-первых, некоторые электрические и большинство электронных устройств чувствительны к направлению протекания тока и должны приспосабливаться к разворотам. Во-вторых, мощность, доступная от обычной розетки, поднимается и опускается в каждом цикле изменения напряжения и на мгновение проходит через ноль в момент разворота. Поэтому лампы слегка мерцают из-за этих колебаний в сети, а устройства, для которых нетерпимо отсутствие мощности даже на одно мгновение, должны накапливать энергию, чтобы не отключаться во время разворотов.

Наконец, максимальное амплитудное значение напряжения сети переменного тока значительно выше его номинального значения в  $\sqrt{2}$  раз ( $\sqrt{2} = 1,414$ ). Например, напряжение фазы обычной 120-вольтовой розетки переменного тока на самом деле колеблется между +170 В и -170 В. Учитывать эти пиковые значения напряжения важно для обеспечения изоляции и электрической безопасности.

## Магнитная индукция

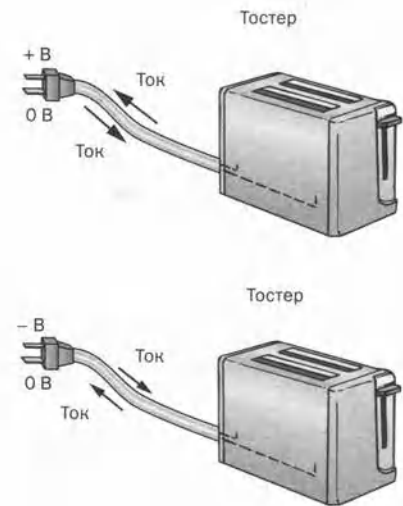
Эдисон был категорическим противником переменного тока, который он считал опасным и странным явлением. Действительно, колебания напряжения и периодическое исчезновение мощности, пусть на мгновение, могут заставить электрика несколько насторожиться.

Пионером и лидером в использовании переменного тока стал Никола Тесла (1856–1943), американский изобретатель сербского происхождения, которому удалось получить финансовую поддержку у американского инженера и промышленника Джорджа Вестингауза (1846–1914). Тесла и Вестингауз разглядели главное преимущество переменного тока — его энергия может быть преобразована, то есть путем электромагнитного воздействия передана от одной цепи в другую с помощью устройства, которое называется трансформатором.

Чтобы передать энергию от одной цепи переменного тока в другую, трансформатор использует два важных принципа, объединяющих электричество и магнетизм. Первый нам уже знаком: движущийся электрический заряд создает магнитное поле. Таким образом обосновывается, что электричество может создавать магнетизм. Второй, новый для нас принцип: изменяющееся во времени магнитное поле создает электрическое поле. Эта связь, открытая в 1831 году Майклом Фарадеем (см. 2), позволяет использовать магнетизм для производства электроэнергии!

### Связь между электричеством и магнетизмом — 2

Изменяющееся во времени магнитное поле создает электрическое поле.



**Рис. 11.2.4.** Ток, проходящий через тостер, периодически меняет направление синхронно с разворотом напряжения фазы (верхний штырь вилки). Напряжение нейтрали (нижний штырь) остается на уровне 0 В.

2 Английский химик и физик Майкл Фарадей (1791–1867) получил лишь начальное образование, а в 14 лет устроился учеником к переплетчику. В 21 год он начал также работать лаборантом у известного химика Хамфри Дэви. Электрохимические эксперименты и знакомство с работами Эрстеда и Ампера привели Фарадея к мысли, что если электричество может создать магнетизм, то и магнетизм должен обладать способностью порождать электричество. Проведя очень тщательно подготовленные эксперименты, Фарадей сумел подтвердить свою догадку. В конце своей карьеры Фарадей стал популярным научным лектором и особенно старался увлечь детскую аудиторию.

Представьте себе, что вы размахиваете взад и вперед постоянным магнитом или попеременно то включаете, то отключаете электромагнит. В обоих случаях при этом вы изменяете во времени магнитное поле и, соответственно, создаете поле электрическое. Если поблизости есть мобильные электрические заряды, которые могут отреагировать на это электрическое поле, они будут ускоряться — таким образом, вы создадите или измените электрический ток и, возможно, также совершите над ним работу. Процесс, в котором изменяющееся во времени магнитное поле создает или изменяет электрический ток, называется магнитной индукцией.

Трансформатор последовательно использует оба принципа, связывающих электричество и магнетизм: электричество создает магнетизм, который создает электричество. Но вместо того чтобы возвращать электроэнергию туда, где она произведена, трансформатор передает эту энергию от тока в одной катушке через магнитное поле току второй катушки.

## Переменный ток и обмотка катушки

Чтобы понять, как происходит передача энергии в трансформаторе, разберем более простой пример. Что происходит в единичной катушке с переменным током?

Поскольку ток придает магнитные свойства, катушка становится электромагнитом. А поскольку проходящий через нее ток периодически меняет направление, то же самое происходит и с магнитным полем. Но если изменяющееся во времени магнитное поле создает электрическое поле, то переменное магнитное поле катушки создает переменное же электрическое поле.

Переменное электрическое поле имеет замечательное свойство: оно действует на тот самый переменный ток, которому обязано своим возникновением! И хотя не вполне очевидно, как именно электрическое поле должно влиять на ток, в конце концов все оказывается очень просто (рис. 11.2.5). Когда ток в катушке растет, индуцированное электрическое поле толкает его назад, таким образом противодействуя его увеличению (рис. 11.2.5, б). Но, когда ток в катушке уменьшается, индуцированное электрическое поле толкает его вперед, тем самым противодействуя его снижению (рис. 11.2.5, г). Удивительно: как бы ни изменялся ток в катушке, индуцированное электрическое поле всегда препятствует этому изменению!

Такое противодействие изменениям универсально для последствий магнитной индукции. В физике оно известно как правило Ленца: явления, вызванные магнитной индукцией, препятствуют вызвавшему их изменению.

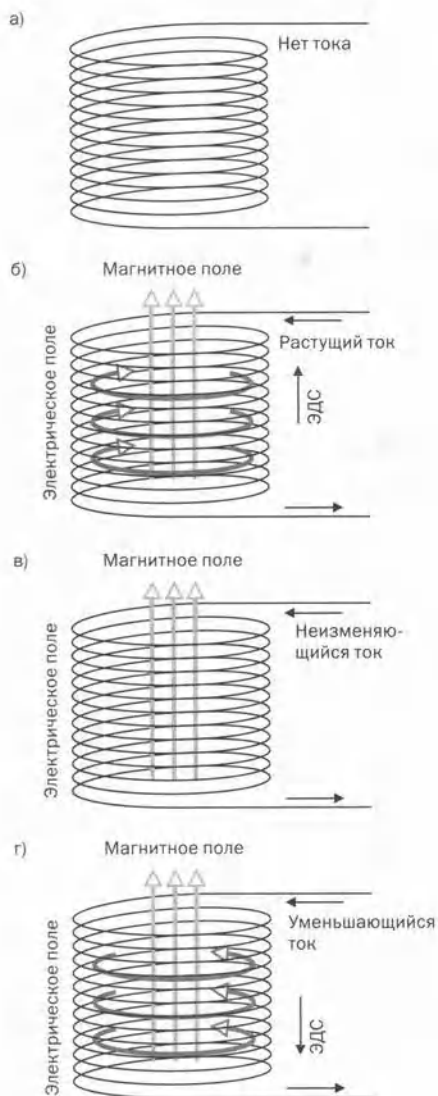
В данном случае направленная на себя магнитная индукция, или самоиндукция, заставляет нашу катушку препятствовать изменению тока в ней самой. Естественное противодействие катушки изменениям тока — свойство, очень полезное и широко применяемое в электротехнике и электронике, где оно называется индуктивностью, а катушка — катушкой индуктивности.

### Правило Ленца

Изменение магнитного потока вызывает ток, препятствующий этому изменению. В более общем виде: действие магнитной индукции препятствует вызвавшему ее изменениям.

Следует заметить, что магнитная индукция не только толкает токи туда-сюда; с ее помощью можно также передавать энергию\*. Индуцированное электрическое поле совершает положительную работу над каждым зарядом, направление движения которого совпадает с направлением воздействия поля. И отрицательную работу — над зарядами, которые движутся против направления воздействия поля.

Когда индукция совершает работу над зарядом, движущимся по обмотке нашей катушки, потенциал заряда увеличивается. Общее повышение потенциала, от входа в катушку до выхода, называется индуцированной ЭДС (это сокращение для выражения “электродвижущая сила”). Но поскольку ток в катушке и индуцированное электрическое поле постоянно меняются, то же происходит и с индуцированной ЭДС — она все время колеблется между положительным и отрицательным значениями. По сходным причинам энергия то выходит из тока, то возвращается обратно. Но где она прячется, когда покидает ток?



**Рис. 11.2.5** (а) Когда через катушку индуктивности не идет ток, то нет ни электрического, ни магнитного полей; (б) растущий ток создает в катушке индуктивности растущее магнитное поле, которое в свою очередь создает электрическое поле. ЭДС, порождаемая электрическим полем, препятствует увеличению тока; (в) неизменяющийся ток создает неизменяющееся магнитное поле; (г) уменьшающийся ток приводит к уменьшению магнитного поля, которое в свою очередь создает другое электрическое поле. В этом случае возникающая ЭДС препятствует уменьшению тока.

Ответ таков: она прячется в магнитном поле катушки! Магнитное поле обладает энергией. Количество энергии однородного магнитного поля равно половине произведения квадрата индукции магнитного поля на объем, деленного на магнитную постоянную. Мы можем записать это соотношение в виде:

$$\text{энергия} = \frac{(\text{магнитная индукция})^2 \times \text{объем}}{2 \times \text{магнитная постоянная}} \quad (11.2.2).$$

### Распространенное заблуждение:

#### Магнит представляет собой неограниченный источник энергии

**Заблуждение:** Магниты могли бы навсегда обеспечить нас электрической или механической энергией!

**На самом деле:** Магнитное поле действительно обладает энергией, но эта энергия ограничена запасом, полученным во время намагничивания. Чтобы извлечь эту энергию, пришлось бы размагнитить (и таким образом уничтожить) магнит.

В каком-то смысле наша катушка “играет” с меняющейся энергией тока: то на короткое время прячет ее в магнитное поле, то возвращает обратно току. Катушка запасает энергию, когда абсолютная величина тока увеличивается — поле усиливается, и ток теряет потенциал. Катушка возвращает энергию в то время, как величина тока уменьшается — поле слабеет, и ток приобретает потенциал. Так как за передачу энергии обратно току отвечает ЭДС самоиндукции катушки, ее часто так и называют — обратная ЭДС.

Самоиндукция и обратная ЭДС катушки позволяют ей с поразительной ловкостью и даже изяществом манипулировать переменными токами и потенциалами. Вы можете без опасения подключить два вывода правильно спроектированной катушки в электрическую розетку; катушка будет периодически накапливать и возвращать энергию. С обычным проводом такой фокус не пройдет!

В отличие от обычного провода, с помощью которого невозможно безопасно получить ток из розетки при одном напряжении и вернуть его туда же при другом, катушка может использовать свою обратную ЭДС, чтобы “оседлать” переменное напряжение в розетке — подобно тому, как плавающая бутылка “сидит” на океанской волне. Движимый ЭДС то в одном, то в другом направлении, ток может войти в катушку при одном напряжении и выйти из нее при совсем другом.

## Две катушки вместе: трансформатор

Когда мы имеем дело с одной катушкой, энергия, которая передается от тока магнитному полю, рано или поздно возвращается току. Ей просто больше некуда деваться. Но что, если у нас есть две катушки и два тока? В этом случае энергию, полученную магнитным полем от одного тока, можно передать второму току!

Этот принцип лежит в основе работы трансформатора. Простейший трансформатор состоит из двух отдельных катушек с общей электромагнитной средой. Вся энергия или ее часть, поступающая в магнитное поле от тока в первой катушке, может быть передана току во второй катушке. Хотя два тока никогда не соприкасаются и не обмениваются ни единым зарядом, энергия с легкостью может переходить от одного к другому.

Проиллюстрируем эту передачу энергии на примере обычной настольной галогенной лампы (рис. 11.2.6). Это устройство состоит из двухкатушечного трансформатора и галогенной лампочки. Одна катушка трансформатора, которая называется первичной обмоткой, подключена непосредственно к электрической розетке и замыкает цепь, связанную с внешним источником энергии (рис. 11.2.7). Переменный ток от сети пропускается через первичную обмотку. Другая катушка трансформатора, его вторичная обмотка, соединена с лампочкой и замыкает вторую цепь — вторичный контур. Чтобы у обеих катушек гарантированно была общая электромагнитная среда, обмотки намотаны вокруг кольцеобразного сердечника, сделанного из способного к намагничиванию материала. Работу сердечника мы рассмотрим немного позже в этом разделе.

Сама по себе (то есть в режиме холостого хода, когда вторичная цепь разомкнута) первичная обмотка действует как индуктор, попеременно запасая энергию в магнит-

\* Говоря об “индукции, толкающей токи”, автор имеет в виду, что электромагнитная индукция может увеличивать или уменьшать ток в контуре, создавая в нем дополнительную электродвижущую силу, вызванную изменением магнитного поля.



Рис. 11.2.6. Галогенная лампочка этой настольной лампы работает от низкого напряжения 12 вольт, поставляемого через трансформатор. Переменный ток течет к лампе и от нее по двум опорным элементам.

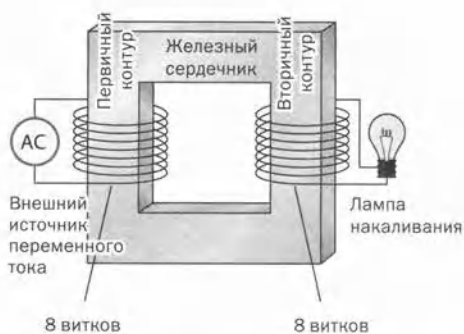


Рис. 11.2.7. Трансформатор передает энергию от тока первичного контура току вторичного контура. Железный сердечник распределяет линии магнитной индукции таким образом, чтобы электромагнитная среда обеих катушек была одинаковой. При одинаковом числе витков на обеих катушках трансформатор передает на вторичную обмотку такое же напряжение, какое получает от первичной.

ном поле, а затем возвращая эту энергию в первичный контур с помощью обратной ЭДС. Так как эта обратная ЭДС связана с напряжением питания (пусть оно будет равно 120 вольт переменного тока), она также составляет 120 вольт переменного тока.

Однако поскольку вторичная обмотка находится в электромагнитной среде первичной катушки, во вторичной обмотке также возникает индуктивная ЭДС и на концах цепи появляется разность потенциалов. Так как вторичная обмотка образует цепь с нитью лампы, эта разность потенциалов создает падение напряжения на нити и пропускает через нее ток. Ток переменный, потому что ЭДС тоже переменная. Словом, посредством электромагнитного воздействия энергия передается от переменного тока в первичной цепи переменному току вторичной цепи, и лампа загорается.

Если трансформатор передает энергию току вторичной цепи, он должен забрать такое же количество энергии от тока первичной цепи. Конечно же, для этого он использует магнитную индукцию. Однако на сей раз это обратная индукция: ток во вторичной цепи создает ЭДС индукции в первичной катушке, которая и отнимает энергию у первичного тока!

Интересен механизм этой передачи. ЭДС индукции в первичной катушке увеличивает первичный ток всякий раз, когда передает энергию в магнитное поле трансформатора, и уменьшает ток всякий раз, когда забирает энергию из поля. Если больше энергии передается, чем забирается, первичный ток оставляет энергию в магнитном поле, а вторичный ток эту энергию забирает!

Примечательно, что процесс передачи энергии автоматически реагирует на любые изменения в потребляемой мощности вторичной цепи. Например, если вы заменили лампочку на более мощную, то по вторичной цепи потечет больше тока, то есть с помощью индукции от первичного контура ко вторичному будет передаваться больше энергии. Но если вообще снять лампу, вторичный ток исчезнет и в первичном контуре процессы передачи и забора энергии будут полностью уравновешивать друг друга.

Последнее замечание, по-видимому, подразумевает, что трансформатор, ко вторичной обмотке которого ничего не подключено, вообще не потребляет энергии, но реальные трансформаторы не настолько совершенны. Вы сможете сэкономить электроэнергию, только отключив бездействующие трансформаторы.

## Меняем напряжение

Трансформатор, конечно, весьма любопытное устройство, но зачем он нужен в настольной лампе? Почему нельзя просто напрямую включить лампу в розетку, чтобы образовалась одна замкнутая электрическая цепь с внешним источником?

В настольной лампе задача трансформатора — обеспечить лампе низковольтное напряжение переменного тока. Как и лампочка в фонарике, настольная лампа рассчитана на малые напряжения. Такие низковольтные лампы получают энергию для нагрева нити от сильного тока с малым напряжением, поэтому нить должна иметь небольшое электрическое сопротивление и быть толстой, короткой и прочной. Высоковольтная лампа, наоборот, получает энергию от слабого тока высокого напряжения, так что нити необходимо большое электрическое сопротивление, поэтому она должна быть тонкой, длинной и хрупкой. Более короткая низковольтная нить также дает более концентрированный свет, что и требуется для настольной лампы. Чтобы обеспечить низкое напряжение, вторичная обмотка трансформатора намотана иначе, чем первичная.

В любом трансформаторе на вторичную обмотку действует индуцированная ЭДС, которая зависит от количества витков — то есть от того, сколько раз провод обвивает сердечник. Чем больше оборотов делает вторичный ток вокруг сердечника, тем больше работа, которую электрическое поле трансформатора совершает над током и тем больше ЭДС. Если количество совершенной работы пропорционально числу витков, то и величина ЭДС индукции вторичной обмотки тоже должна быть пропорциональна количеству витков.

Но чему равна фактическая ЭДС индукции в конкретном трансформаторе? Предположим, что у нас есть простой трансформатор с двумя идентичными катушками — они имеют равное число витков — и что первичная обмотка трансформатора подключена к розетке сети напряжением 120 В.

Поскольку первичная обмотка трансформатора действует в качестве индуктора, ее обратная ЭДС соответствует подаваемому на нее переменному напряжению и, следовательно, тоже равна 120 В. Но раз две катушки идентичны и находятся в общей электромагнитной среде, точно такая же ЭДС индукции появляется во вторичной обмотке. Если ко вторичной обмотке присоединить соответствующую лампу, чтобы образовалась замкнутая цепь, вторичная катушка будет действовать как источник электроэнергии с напряжением 120 В и лампа загорится.

Это простое устройство известно как изолирующий или разделительный трансформатор. При подключении его первичной обмотки к сети переменного тока вторичная обмотка выступает как источник питания с тем же напряжением, что и в розетке. Хотя вторичная обмотка лишь воспроизводит источник питания, изолирующий трансформатор обеспечивает высокую степень электробезопасности. Поскольку первичный и вторичный контуры электрически изолированы, заряды не могут перемещаться между этими цепями и, соответственно, не могут создать проблем. Например, если в провода городской сети ударит молния, то образовавшийся в результате этого всплеск зарядов в первичном контуре не сможет пройти ни в один прибор, подключенный ко вторичной цепи. Неудивительно, что разделительные трансформаторы часто используют в больницах, чтобы защитить пациентов от ударов током.

Однако у большинства трансформаторов в первичной и вторичной обмотках разное число витков и, соответственно, разные ЭДС. Так как ЭДС индукции во вторичной обмотке пропорциональна количеству витков, она действует как источник питания с напряжением, равным напряжению на первичной обмотке, умноженному на отношение количества витков во вторичной и первичной обмотках:

$$\text{вторичное напряжение} = \text{первичное напряжение} \times \frac{\text{число витков во вторичной обмотке}}{\text{число витков в первичной обмотке}} \quad (11.2.3)$$

Таким образом, изолирующий трансформатор — это просто частный случай трансформатора, в котором число витков в обеих обмотках одинаково и их отношение равно 1. Трансформатор настольной лампы называется понижающим, потому что число витков вторичной катушки меньше, чем первичной, и соответственно, напряжение на вторичной обмотке меньше, чем на первичной (рис. 11.2.8). Если отношение числа витков будет равно 0,1, то вторичная обмотка станет источником питания с напряжением 12 В.

Разумеется, существуют и повышающие трансформаторы, в которых число витков у вторичной обмотки больше, чем у первичной, следовательно, и напряжение на вторичной обмотке выше, чем на первичной (рис. 11.2.9). В трансформаторах, питающих неоновые вывески и рекламные щиты, количество витков во вторичной обмотке, как правило, в сто раз больше, чем в первичной. Если первичная обмотка питается от сети переменного тока напряжением 120 В, то вторичная обмотка обеспечивает напряжение 12 000 В, необходимое для работы неоновой трубки.

Даже когда первичное и вторичное напряжения различаются, трансформатору все равно удается не терять энергию. В то время как каждый дополнительный виток вторичной обмотки увеличивает вторичное напряжение, он также увеличивает скорость, с которой вторичный ток забирает энергию из магнитного поля трансформатора. При увеличении количества витков во вторичной обмотке для увеличения напряжения необходимо пропорционально уменьшить ток во вторичном контуре, чтобы не изменилось количество энергии, которое он отбирает из магнит-

Рис. 11.2.9. Поскольку во вторичной обмотке этого повышающего трансформатора в 100 раз больше витков, чем в первичной, он повышает напряжение со 120 В до 12 000 В. Чтобы избежать потерь энергии, ток во вторичном контуре составляет 0,01 или 1/100 первичного тока. Благодаря этому суммарная мощность, которую трансформатор получает от первичной обмотки, равна мощности, которую неоновая реклама потребляет от вторичной обмотки.

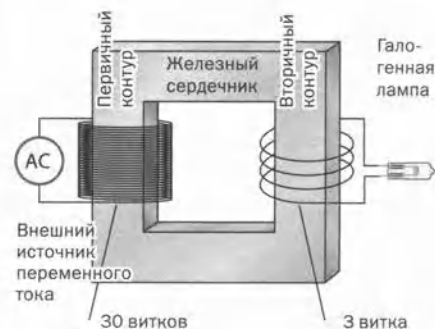
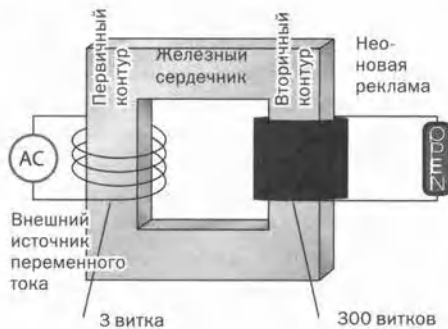


Рис. 11.2.8. В первичной обмотке этого понижающего трансформатора в 10 раз больше витков, чем во вторичной, поэтому напряжение снижается со 120 В до 12 В. Чтобы избежать потерь энергии, ток во вторичном контуре в 10 раз сильнее, чем в первичном. Благодаря этому суммарная мощность, которую трансформатор получает от первичной обмотки, равна мощности, которую лампа потребляет от вторичной обмотки.



ного поля. В результате вторичный ток равен первичному току, умноженному на отношение числа витков первичной обмотки к числу витков вторичной обмотки:

$$\text{ток во вторичной обмотке} = \text{ток в первичной обмотке} \times \frac{\text{число витков в первичной обмотке}}{\text{число витков во вторичной обмотке}} \quad (11.2.4).$$

В понижающем трансформаторе настольной лампы число витков первичной обмотки в 10 раз больше, чем вторичной. Следовательно, в соответствии с уравнениями (11.2.3) и (11.2.4), вторичное напряжение в десять раз меньше первичного, а вторичный ток в десять раз больше первичного. Если 12-вольтовая лампочка, которую вы вкрутили в ваш настольный светильник, рассчитана на потребляемую мощность 24 Вт, по вторичному контуру будет протекать ток силой 2 А. Чтобы обеспечить такую мощность, по первичной обмотке трансформатора будет идти переменный ток силой 0,2 ампера при напряжении 120 В. Таким образом, из первичного контура во вторичный будет передаваться мощность 24 Вт.

## Трансформаторы: в погоне за совершенством

До сих пор мы делали вид, что катушки индуктивности и трансформаторы лишены недостатков и что их провода идеально проводят электричество, но это не совсем верно. На самом деле провода, используемые в этих устройствах, обладают электрическим сопротивлением и теряют энергию пропорционально квадрату пропускаемого тока. Чтобы уменьшить потери, реальные катушки индуктивности и трансформаторы сконструированы так, чтобы минимизировать это сопротивление. Для этого по мере возможности используют толстые и как можно более короткие провода, изготовленные из металлов с высокой проводимостью.

К сожалению, катушки индуктивности и трансформаторы, сделанные исключительно из проводов, не могут обеспечить сильное магнитное поле, необходимое для хранения больших запасов энергии, если только не используют длинные обмотки со множеством витков. Чтобы избежать длинных обмоток, во многих катушках индуктивности и практически во всех трансформаторах провода намотаны на магнитный сердечник. Такие сердечники под воздействием переменного тока создают сильные магнитные поля, в которых можно хранить большие количества энергии. Благодаря этим материалам с высокой магнитной восприимчивостью — обычно применяют железо или железные сплавы — катушки индуктивности и трансформаторы на сердечниках хорошо работают даже при коротких, в несколько витков, обмотках.

Сердечник отвечает за главное свойство трансформатора: он ориентирует линии магнитной индукции таким образом, что практически все они проходят через обе катушки, даже когда последние находятся на некотором расстоянии друг от друга. Общие линии магнитной индукции создают для обеих катушек общую электромагнитную среду и облегчают им обмен электроэнергией.

Однако заставить две отдельные катушки иметь общие линии магнитной индукции не так просто, как кажется. Поскольку катушка не имеет магнитного полюса, каждая выходящая из нее линия должна в конечном итоге в нее же и вернуться. В отсутствие сердечника большинство выходящих линий магнитной индукции далеко не отклоняются и, описав короткую кривую, возвращаются в катушку. Вероятность, что при этом они пройдут через соседнюю катушку, очень невелика. Неудивительно, что трансформаторы без сердечника нормально работают только в случае, если обмотки двух катушек расположены очень близко, так что через них проходят общие линии магнитной индукции.

Если намотать обе катушки на кольцеобразный магнитный сердечник, то линиям магнитной индукции будет легче пройти через обе катушки, потому что эти линии втягиваются в мягкий магнитный материал сердечника и проходят по кольцу, словно по трубе. Несмотря на то что линии магнитной индукции, выходящие из первичной катушки, все равно в конце концов в нее возвращаются, большинство из них идет вдоль сердечника и таким образом проходит через вторую катушку. А когда почти все линии магнитной индукции пролегают через обе катушки, энергия может легко перетекать от одной катушки к другой.

Таким образом, сердечник предоставляет трансформатору больше выбора: расположение обмоток может быть произвольным, важно только, чтобы они

были намотаны на один и тот же сердечник. Тем не менее и сердечники — не идеальная “труба” для магнитной индукции: они всегда слегка “протекают”. Поэтому самые эффективные трансформаторы — это те, в которых обмотки расположены рядом, одна над другой или даже одна поверх другой.

Но несмотря на то что намагничивающиеся сердечники делают небольшие трансформаторы более практичными и эффективными, с сердечниками связаны и некоторые проблемы. Во-первых, они должны очень быстро намагничиваться и размагничиваться, чтобы не отставать от процесса попеременного поступления и отвода энергии. Отставание магнитного поля сердечника приведет к потерям энергии в виде тепла. К сожалению, абсолютная магнитная мягкость недостижима, так что все сердечники теряют хотя бы небольшую часть энергии из-за отставания в намагничивании.

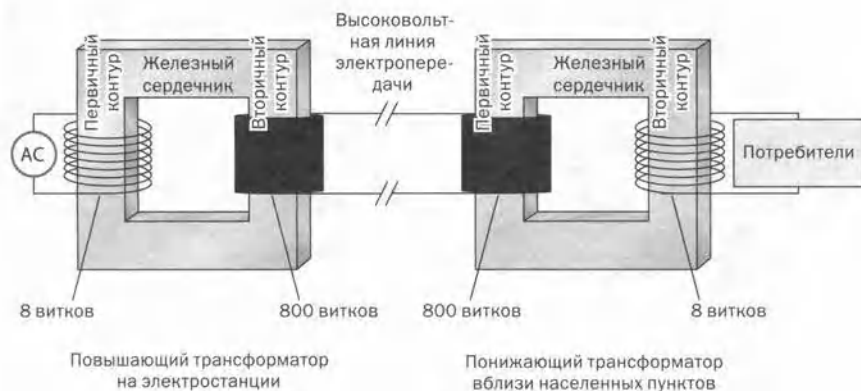
Во-вторых, поскольку сердечники подвергаются воздействию тех же электрических полей, которые управляют токами в обмотках, сердечник не должен проводить электричество. В противном случае внутри него будут возникать бесполезные внутренние токи, известные как вихревые токи или токи Фуко, то есть сердечник будет нагреваться и терять энергию. Поскольку большинство мягких магнитных материалов электропроводны, сердечники трансформаторов часто разделены на изолированные секции или пластины, между которыми будет течь минимальный ток или вообще не будет тока. Но, несмотря на все старания инженеров минимизировать потери, связанные с омическим сопротивлением обмоток, намагничиванием и вихревыми токами в сердечниках, все трансформаторы все равно теряют некоторое количество энергии. Самые совершенные трансформаторы могут похвастаться энергоэффективностью, близкой к 99% (об еще одном интересном устройстве, напоминающем трансформатор, см. ❸).

## Передача и распределение электроэнергии

Вот теперь мы наконец-то готовы обсуждать главную проблему передачи электроэнергии. Чтобы свести к минимуму теплотери проводов, связанные с их омическим сопротивлением, на линиях электропередачи, соединяющих электростанцию с отдаленными городами, нужно использовать слабые токи при очень высоких напряжениях. Однако из соображений эффективности, а также безопасности — чтобы минимизировать риск ударов током и пожаров, — в дома эта же электроэнергия должна поступать в виде сильного тока под умеренным напряжением.

Если речь идет о постоянном токе, то простого способа удовлетворить одновременно оба эти требования не существует; однако это легко можно сделать при помощи трансформаторов, если поставить на службу переменный ток. Повышающий трансформатор дает нам возможность получить ток очень высокого напряжения, который подходит для передачи на дальние расстояния, а понижающий трансформатор поможет превратить его в низковольтный ток, удобный для потребителей (рис. 11.2.10).

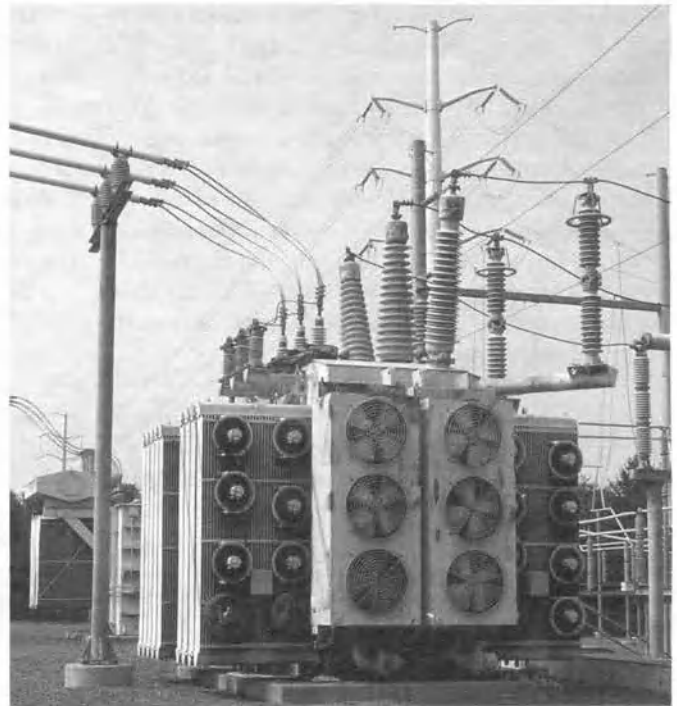
На электростанции генератор подает переменный ток огромной силы в первичную цепь повышающего трансформатора под напряжением около 5000 В. Ток во вторичном контуре составляет лишь около одной сотой доли тока в первичном контуре, но напряжение его значительно выше, обычно около 500 000 В.



❸ **Металлоискатели** (металлодетекторы) по большей части представляют собой сложные трансформаторы без катушек и сердечников. Роль этих недостающих частей сыграет металл, который и предстоит обнаружить. В простейшем любительском металлоискателе на приемную катушку (детектор) подается высокочастотный переменный ток. Устройство показывает присутствие металла, когда ощущает изменение собственной индуктивности катушки, вызванное ее электромагнитным взаимодействием с этим металлом. Более сложные металлоискатели, в том числе те, которые используют для контроля безопасности в аэропортах, часто имеют две отдельные катушки — одна индуцирует в металле ток и намагниченность, вторая измеряет ЭДС, возникающую при изменении магнитного поля вокруг обнаруженного металла.

**Рис. 11.2.10.** Для переноса электроэнергии на дальние расстояния на электростанции прежде всего повышают напряжение до очень высоких значений, затем передают энергию в виде слабого тока высокого напряжения, с последующим снижением напряжения вблизи обслуживаемых населенных пунктов. Вторичный контур повышающего трансформатора служит первичным контуром понижающего.

**Рис. 11.2.11.** Гигантский трансформатор передает миллионы ватт электроэнергии от высоковольтной линии (вверху) в районную распределительную сеть среднего напряжения (слева). Вентиляторы предохраняют трансформаторы от перегрева.



Вторичная цепь трансформатора чрезвычайно длинная, она тянется до места, где предполагается использовать электроэнергию. Благодаря умеренным значениям силы тока, потери энергии на нагрев проводов остаются в допустимых пределах. Дойдя до пункта назначения, ток высоковольтной линии проходит через первичную обмотку понижающего трансформатора (рис. 11.2.11). Напряжение на вторичной обмотке этого трансформатора в сто раз меньше, а сила тока — в сто раз больше, чем в первичной.

Теперь напряжение снижено до значений, разумных с точки зрения использования в быту. Непосредственно перед входом в жилище это напряжение еще раз понижается. Последние понижающие трансформаторы в цепочке вы можете увидеть где-нибудь неподалеку от вашего дома: это или висящая на столбе металлическая коробка, похожая на огромную консервную банку (рис. 11.2.12), либо выкрашенный в зеленый цвет металлический ящик, стоящий на земле (рис. 11.2.13). Ток входит в ваш дом с напряжением от 110 до 240 В, в зависимости от местных стандартов. Хотя при напряжении 240 В меньше внутридомовые потери, оно менее безопасно, чем 110 В. В США принято стандартное напряжение 120 В, в Европе 230 В.

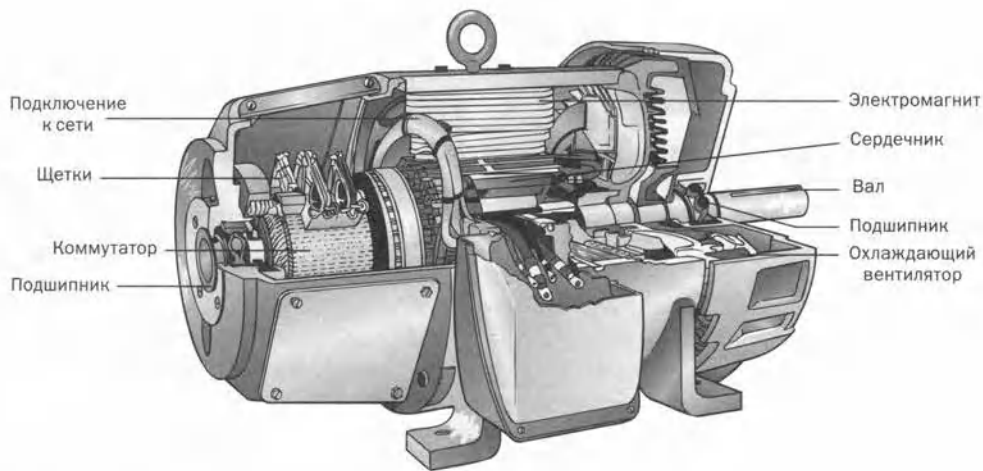
**Рис. 11.2.12.** Три металлических цилиндра на столбе — это трансформаторы. Они передают энергию от распределительной сети среднего напряжения (провода вверху) низковольтной внутренней сети (провода в правом нижнем углу).



**Рис. 11.2.13.** В ящике находится трансформатор, который передает мощность от подземной цепи среднего напряжения подземной низковольтной сети, обслуживающей несколько близлежащих домов. Его мощность составляет 50 кВ·А или 50 000 Вт.







## 11.3 Электрические генераторы и двигатели

Мы уже знаем, что такое электричество и как оно передается и распределяется. Теперь давайте выясним, как оно производится — каким образом механическое движение используется для получения электроэнергии. Мы также рассмотрим на примере электродвигателя обратное превращение — каким образом электроэнергию можно использовать для получения механического движения. Почти полная симметрия двух последних фраз позволяет предсказать удивительный вывод: генератор и электромотор могут быть одним и тем же устройством!

Без генератора невозможно представить себе электростанцию, но в домашнем хозяйстве эти устройства встречаются не так уж часто. В основном мы имеем дело с генераторами автомобилей и аварийных источников питания. Однако электродвигатели, вращающие соответствующие части бесчисленных бытовых приборов, окружают нас повсюду. Иногда это вращение на виду, как в вентиляторах и миксерах, но чаще спрятано, как в стиральной машине или мобильном телефоне. Двигатели бывают самых разных форм и размеров, в соответствии со стоящими перед ними задачами. Какие бы мощность или момент силы вам ни требовались, вы всегда можете подобрать что-то подходящее. Существуют двигатели постоянного тока, которые могут питаться и от батареи, в то время как другие требуют переменного тока. Есть даже двигатели, которые работают на обоих типах тока.

### Электрогенераторы переменного тока: механическая энергия превращается в электрическую

Генератор преобразует механическую энергию в электрическую. Его вращающийся магнит создает внутри обмотки переменное магнитное поле и тем самым индуцирует в ней переменную ЭДС. Если подключить к обмотке генератора лампу и замкнуть цепь, то обмотка будет выступать в качестве источника электрической энергии переменного тока и лампа загорится.

Звучит знакомо, не так ли? Это потому, что происходящие процессы очень похожи на те, что имеют место в трансформаторе. Собственно говоря, единственная существенная разница между трансформатором и генератором состоит в том, каким именно образом создается переменное магнитное поле!

На **рис. 11.3.1** изображена схема простейшего генератора, поразительно похожая на схему трансформатора с **рис. 11.2.7**. В обоих устройствах имеется вторичная обмотка, намотанная на магнитный сердечник. Но там, где у трансформатора первичная обмотка, у генератора стоит вращающийся магнит (ротор). При вращении магнитный ротор создает в обмотке синусоидально меняющееся магнитное



**Рис. 11.3.1.** Этот генератор очень напоминает трансформатор с **рис. 11.2.7**, за исключением того, что энергия передается от вращающегося магнитного ротора, а не от тока в первичной обмотке.

поле. Это переменное магнитное поле в свою очередь создает переменное электрическое поле и индуцирует в обмотке переменную ЭДС. Эта ЭДС зажигает лампу.

Данное описание кратко, но точно объясняет, каким образом генератор переменного тока производит электрическую энергию. Но как хранится энергия и что определяет частоту и напряжение переменного тока генератора? Поскольку генератор не может создавать энергию из ничего, любая электрическая энергия, которую он передает току во вторичной обмотке, должна порождаться механической энергией ротора. Давайте посмотрим, как в процессе выработки электроэнергии происходит извлечение механической энергии из ротора.

Для простоты условимся, что мы по большей части будем игнорировать силы, обусловленные самим магнитным сердечником. Чем мы никак не можем пренебречь, так это тем, что магнитный сердечник управляет линиями магнитной индукции. Сердечник образует между ротором и обмоткой магнитный мостик, передавая магнитное поле ротора в обмотку, даже если ротор и обмотка не соприкасаются. Когда ротор вращается, его магнитное поле пронесется по обмотке, как если бы они почти касались друг друга. Благодаря сердечнику у ротора и обмотки общая электромагнитная среда.

Когда лампа выключена, замкнутая цепь отсутствует и тока в обмотке генератора нет. Так как генератор не вырабатывает электроэнергию, ему не нужно извлекать механическую энергию из ротора. Понятно, что при этом ротор свободно вращается; обмотка, в которой нет тока, немагнитна, и магнитное поле ротора беспрепятственно через нее пронесется!

Но когда лампа подключена к генератору, образуется электрическая цепь, по которой может течь ток. Теперь, когда магнитное поле ротора прокатывается по обмотке, оно индуцирует в ней переменный ток и зажигает лампу. Выработка электроэнергии имеет серьезные последствия для ротора: поскольку обмотка, по которой течет ток, магнитна, она взаимодействует с ротором и извлекает из него механическую энергию.

Взаимодействие между ротором и обмоткой начинается в момент, когда магнитное поле ротора проникает в обмотку. Появившееся магнитное поле индуцирует в обмотке ток, вследствие чего возникает новое магнитное поле, направленное противоположно полю ротора. В соответствии с правилом Ленца индуцированное магнитное поле обмотки направлено против вторгающегося магнитного поля ротора — то есть противодействует изменению, в результате которого оно возникло. По сути, обмотка становится электромагнитом с одноименными полюсами, ориентированными так, чтобы отталкивать приближающиеся полюсы ротора. Следовательно, ротор должен совершить механическую работу для того, чтобы расположить свои полюсы в соответствии с полюсами обмотки и преодолеть отталкивание.

Ротор продолжает вращаться, и вскоре его магнитное поле начинает выходить за пределы обмотки. Выход поля вновь индуцирует ток в обмотке, но на этот раз в противоположном направлении. Индуцированное магнитное поле обмотки на этот раз направлено в ту же сторону, что и поле ротора. Таким образом, индуцированное поле опять противодействует изменению, в результате которого оно возникло, — уходу магнитного поля ротора. Но теперь обмотка становится электромагнитом с противоположными полюсами, ориентированными так, чтобы притягивать удаляющиеся полюсы ротора. И теперь ротор должен совершать механическую работу, чтобы оторваться от притяжения обмотки.

У ротора нет ни секунды передышки: сначала он должен совершать работу, чтобы ориентировать свои полюсы в соответствии с полюсами обмотки, а потом — чтобы аннулировать эту операцию. Вся электрическая мощность, потребляемая лампой, извлекается из ротора генератора в виде механической энергии.

Вы можете в буквальном смысле пощупать руками это преобразование энергии, покрутив вручную ротор небольшого генератора. Вращая ротор, вы буквально почувствуете, как лампа извлекает из вас энергию. И чем больше энергии потребляет лампа, тем сильнее становятся индуцированный ток и магнитное поле обмотки и тем больше механической энергии вам нужно затратить, чтобы поддерживать вращение ротора.

Конечно, обычно людям не приходится вращать генераторы вручную. Промышленные генераторы, как правило, получают нужную им механическую энергию от паровых турбин, пар для которых производят, сжигая полезные ископае-

мые, такие как уголь, нефть и природный газ, либо уран. Другие промышленные генераторы для вращения турбин используют возобновляемые ресурсы — воду или ветер. Небольшие коммерческие или домашние генераторы чаще работают на бензине или дизельном топливе.

## Частота тока и выходное напряжение генератора

Частота переменного тока, вырабатываемого генератором, пропорциональна скорости вращения ротора. Причина в том, что переменное выходное напряжение генератора — то есть индуцированная в обмотке ЭДС — является результатом периодического прохождения магнитных полюсов ротора вдоль обмотки. ЭДС меняет знак всякий раз, когда пара полюсов меняет ориентацию относительно обмотки, следовательно, полный цикл изменения выходного напряжения генератора включает два изменения положения полюсов. Для ротора с одной парой полюсов (как на рис. 11.3.1) ЭДС меняется один раз за один оборот ротора.

Таким образом, генератор на рис. 11.3.1 при скорости вращения ротора 60 раз в секунду обеспечивает выход переменного тока с частотой 60 Гц. Если бы ротор представлял собой более сложный магнит с двумя парами полюсов, ему бы достаточно было совершать 30 оборотов в секунду, чтобы произвести такой же ток с частотой 60 Гц. Эта связь между скоростью вращения ротора и частотой тока объясняет, почему все генераторы, работающие по принятому в США стандарту 60 Гц, совершают 60 или кратное этому числу количество оборотов в секунду. В европейской энергосистеме с ее 50 Гц, базовая скорость вращения составляет 50 оборотов в секунду. И потому, что выходные напряжения всех генераторов, составляющих единую энергосистему, должны меняться одновременно, вращение всех роторов должно быть идеально синхронизировано. Любая энергосистема напоминает хорошо отрепетированный балет, в котором от каждой балерины требуется предельная слаженность движений с остальной группой.

Помимо поддержания требуемой частоты, генератор должен давать на выходе определенное напряжение; его ротор должен индуцировать в обмотке определенную ЭДС. Величина индуцированной ЭДС зависит от трех факторов: количества витков в катушке, магнитной индукции и частоты изменения магнитного поля. Увеличение любого из этих факторов повышает ЭДС катушки и, следовательно, выходное напряжение генератора.

Увеличение количества витков в обмотке генератора аналогично увеличению числа витков во вторичной обмотке трансформатора: чем больше раз провод обвивает переменное магнитное поле генератора, тем большую работу возникающее в результате электрическое поле может совершить над зарядами в этом проводе и тем выше индуцируемая в обмотке ЭДС. Как и в трансформаторе, выходное напряжение генератора пропорционально числу витков в обмотке.

Магнитная индукция и частота магнитного поля влияют на выходное напряжение генератора, поскольку оба эти фактора влияют на электрическое поле в обмотке. Сильное или чаще меняющееся магнитное поле создает электрическое поле большей напряженности, и следовательно, тем больше величина возникающей в обмотке ЭДС.

Хороший генератор переменного тока всегда обеспечивает требуемые напряжение и частоту. Так как скорость вращения ротора влияет на обе характеристики, в генераторе имеется специальная система, контролирующая равномерность вращения ротора независимо от того, сколько электроэнергии потребляется. Если вы подключите к генератору больше ламп, так что ток будет извлекать из ротора больше механической работы, эта система потребует повысить подачу пара или топлива, чтобы ротор мог сохранить ту же скорость вращения. Вы наверняка слышали эту автоматическую реакцию, подключая какое-нибудь дополнительное оборудование в автомобиле: в этом случае двигатель, который вращает генератор, переходит на более интенсивный режим.

При равномерном вращении ротора выходное напряжение генератора поддерживается более или менее постоянным. Однако это напряжение можно дополнительно регулировать, меняя количество витков в обмотке генератора или магнитную индукцию. Генератор с автоматической регулировкой обычно использует для этого электромагнит ротора, уменьшая или увеличивая его силу, чтобы соответственно повысить или понизить выходное напряжение.

Во многих генераторах предусмотрена возможность использовать только часть обмотки, чтобы получать меньшую ЭДС и, следовательно, более низкое выходное напряжение. Например, обычный бытовой аварийный генератор обеспечивает 240 В переменного тока при использовании полной обмотки и 120 В — от половины обмотки. 120-вольтовая розетка на этом генераторе подключена к половине обмотки, а 240-вольтовая — ко всей обмотке. Таким образом, пользуясь одним генератором, можно одновременно получать два разных напряжения!

## Электродвигатели переменного тока: превращение электрической энергии в механическую

Двигатель преобразует электрическую энергию в механическую. Если вас удивляет, почему речь о двигателях идет в том же разделе, что и о генераторах, вспомните, что генератор преобразует механическую энергию в электрическую. Как видите, это две электрические машины противоположного действия.

После этого логично предположить, что и устроены они противоположным образом. Так, но не совсем. Двигатели и генераторы, в сущности, устроены одинаково; разница в направлении движения тока. И хотя обычно для каждого устройства предусмотрено конкретное применение, очень часто можно заставить генератор работать как двигатель, и наоборот. Достаточно просто изменить направление тока!

Результат обращения тока вспять в генераторе не должен быть для вас неожиданностью. Мы уже видели, что механическая работа, извлекаемая генератором из ротора, равна нулю, когда ток равен нулю. Эта работа возрастает пропорционально току, который генератор пропускает через лампу. Но до сих пор мы не рассматривали, что произойдет, если значения тока будут отрицательными — если он пойдет в направлении, обратном его обычному движению через лампу. В этом случае механическая работа, извлекаемая из ротора, тоже должна быть отрицательной: генератор будет передавать механическую работу ротору и таким образом превратится в двигатель!

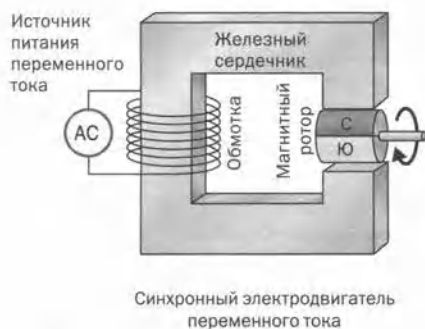
Однако ток, который мы направляем в обратную сторону, — и так переменный, так как же мы можем его “развернуть”? Поскольку генератор обычно выводит ток наружу из того конца обмотки, на котором в данный момент более высокое напряжение, то “разворот” означает, что ток будет входить в генератор на этом конце обмотки. Цель разворота — заставить устройство потреблять, а не производить электроэнергию, заставить его работать как двигатель.

Преобразование генератора в двигатель также можно объяснить в терминах разворота магнитных сил. Разворот переменного тока в обмотке меняет местами ее магнитные полюсы, так что обмотка начинает отталкивать ротор в тех случаях, в каких раньше притягивала, и притягивать — когда отталкивала. Теперь, когда ротор ориентируется в соответствии с полюсами обмотки, обмотка притягивает приближающийся полюс и совершает над ротором работу. А потом, когда ротор движется дальше, выводя магнитное поле из обмотки, обмотка отталкивает удаляющиеся полюсы и опять-таки совершает при этом работу. В итоге электрическая энергия обмотки превращается в механическую энергию ротора — а это и есть фирменный признак любого мотора.

В данном случае мы говорим о синхронном электродвигателе переменного тока — разновидности моторов, ротор которых идеально синхронизирован с переменным током от источника питания (**рис. 11.3.2**). Когда такой двигатель подключают к розетке 60 Гц, ротор совершает ровно 60 оборотов в секунду, либо количество оборотов кратно этому числу, если ротор имеет несколько пар полюсов.

Жесткая привязка к частоте сети переменного тока делает синхронный электродвигатель переменного тока устойчивым и надежным, но его трудно запустить. Если ротор не вращается или вращается с неправильной скоростью, меняющиеся магнитные полюсы обмотки будут “не в такт” отталкивать или притягивать ротор, и он не сможет выйти на нужный режим вращения. Вот почему на практике в большинстве синхронных двигателей переменного тока предусмотрены дополнительные компоненты. Часто для того, чтобы помочь ротору начать вращаться в нужном направлении и достичь заданной скорости вращения, используется несколько обмоток.

Сходство между **рис. 11.3.1** и **11.3.2** поднимает еще один важный вопрос: если генератор и двигатель — одно и то же устройство и вы подключаете его к сети



**Рис. 11.3.2.** Синхронный электродвигатель переменного тока напоминает трансформатор (**рис. 11.2.7**), за исключением того, что энергия извлекается из вращающегося магнитного ротора, а не из электрического тока во вторичной обмотке.

переменного тока, то от чего зависит, будет ли оно действовать как генератор или как двигатель? Ответ на этот вопрос на удивление прост: машина действует как генератор, когда вы совершаете работу над ротором, и как двигатель — когда вы извлекаете работу из ротора!

Устройство реагирует на ваши действия таким образом, чтобы ротор продолжал вращаться синхронно с сетью переменного тока. При попытке ускорить ротор, вращая его вперед и совершая над ним работу, устройство работает в режиме генератора: оно отбирает у вас механическую энергию, вырабатывает электроэнергию и подает последнюю в сеть. Толкая ротор вперед, вы ускоряете ориентацию ротора до того положения, когда обмотка начнет отталкивать его приближающиеся полюсы, а затем — притягивать, когда полюсы начнут удаляться от обмотки, — действия, характерные для генератора.

И наоборот, если вы попытаетесь замедлить вращение ротора, толкая его в обратную сторону и давая ему совершить работу над вами, машина будет действовать как двигатель: она извлечет электроэнергию из сети и передаст ее вам в виде механической энергии. Ваш толчок в обратную сторону замедлит ориентацию ротора относительно катушки до того положения, когда обмотка начнет притягивать его приближающиеся полюсы, а затем отталкивать, когда полюсы начнут удаляться от обмотки, — действия, характерные для двигателя.

А если вы оставите вращающийся ротор в покое и предоставите ему свободно вращаться по инерции, он сориентируется промежуточным образом между этими двумя крайними положениями так, чтобы средняя работа, которую совершает над ним электромагнитная обмотка, была равна нулю.

## Электродвигатели постоянного тока

Так как большинство современных портативных устройств рассчитаны на постоянный ток и питание от батареи, они не могут использовать синхронные двигатели переменного тока. Если через обмотку синхронного двигателя пропускать постоянный ток, обмотка будет вести себя как постоянный магнит и ротор не будет вращаться: притяжение между противоположными полюсами привяжет ротор к обмотке, и он уже не сможет двигаться. Когда полюсы ротора окажутся от противоположных полюсов катушки на минимально возможном расстоянии, ротор придет в состоянии устойчивого равновесия.

Чтобы ротор мог и дальше вращаться, что-то должно полностью разворачивать магнитное поле обмотки каждый раз, когда ротор приходит в устойчивое равновесие. В результате притяжение превратилось бы в отталкивание и ротор вдруг оказывался бы в состоянии неустойчивого равновесия. Вместо того чтобы остановиться, ротор будет вращаться в поисках нового устойчивого равновесия. Но когда он его достигнет, направление магнитного поля обмотки опять изменится на противоположное. Таким образом, ротор будет вращаться вечно, стремясь привести ориентацию своих полюсов в соответствие с противоположными полюсами обмотки, но никогда в этом не преуспеет. Можно сказать, что в этой электромеханической машине воплощен миф о Сизифе, вкатывающем на гору тяжелый камень, который, едва достигнув вершины, каждый раз скатывается вниз.

Разворачивать магнитное поле катушки так же просто, как менять направление тока на противоположное. Все, что нужно, — это переключатель, который меняет местами два провода, соединяющие обмотку с батареей. Всякий раз, когда ротор ориентируется в соответствии с противоположными полюсами обмотки, этот переключатель моментально меняет местами соединения и тем самым разворачивает в обратном направлении ток в обмотке и магнитное поле.

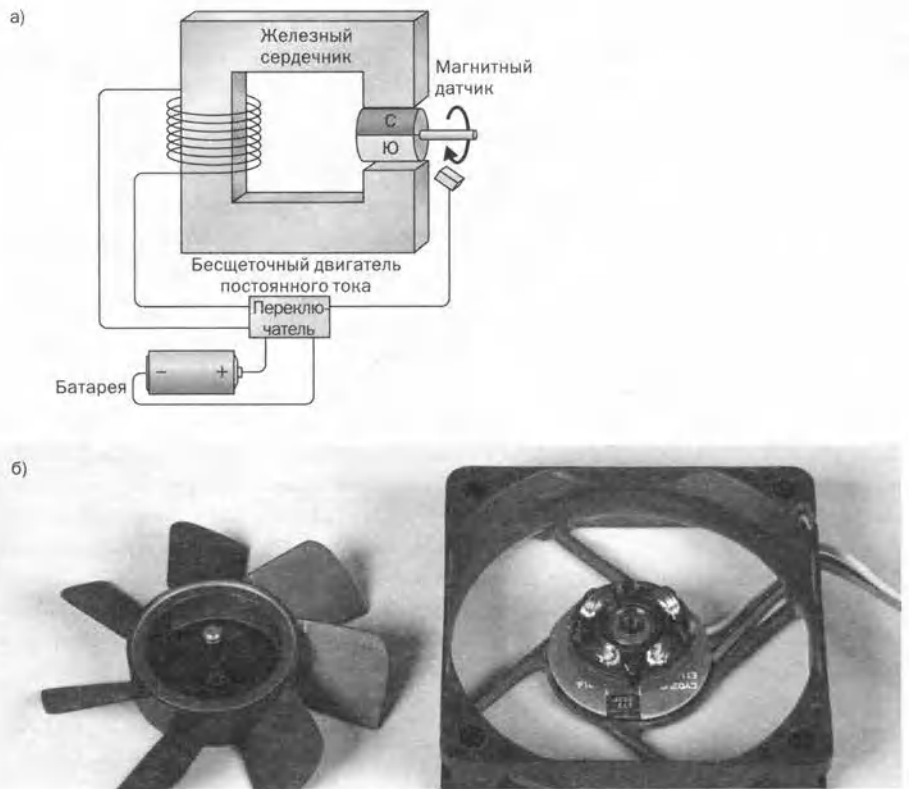
Такие переключатели можно найти практически в каждом электродвигателе постоянного тока, но технические решения в разных двигателях отличаются. Однако существует как минимум два общих подхода, которые реализуются как минимум в двух разных типах двигателей постоянного тока: бесщеточном и щеточном.

Бесщеточный двигатель постоянного тока — это попросту синхронный двигатель переменного тока, к которому добавлен электронный переключатель. Переключатель разворачивает ток всякий раз, когда полюсы ротора занимают положение соответственно противоположным полюсам стационарной обмотки (рис. 11.3.3, а). Из-за электронных переключателей бесщеточные двигатели до-

Рис. 11.3.3

(а) В бесщеточном двигателе постоянного тока для вращения магнитного ротора используется электромагнит. Датчик контролирует ориентацию ротора и разворачивает направление тока в электромагните каждый раз, когда ротор ориентируется в соответствии с магнитным полем.

(б) Компьютерный вентилятор также использует бесщеточный двигатель постоянного тока. Его стационарный четырехполюсный электромагнит помещен внутри кольцеобразного постоянного магнита ротора. Черный магнитный датчик расположен под электромагнитами.



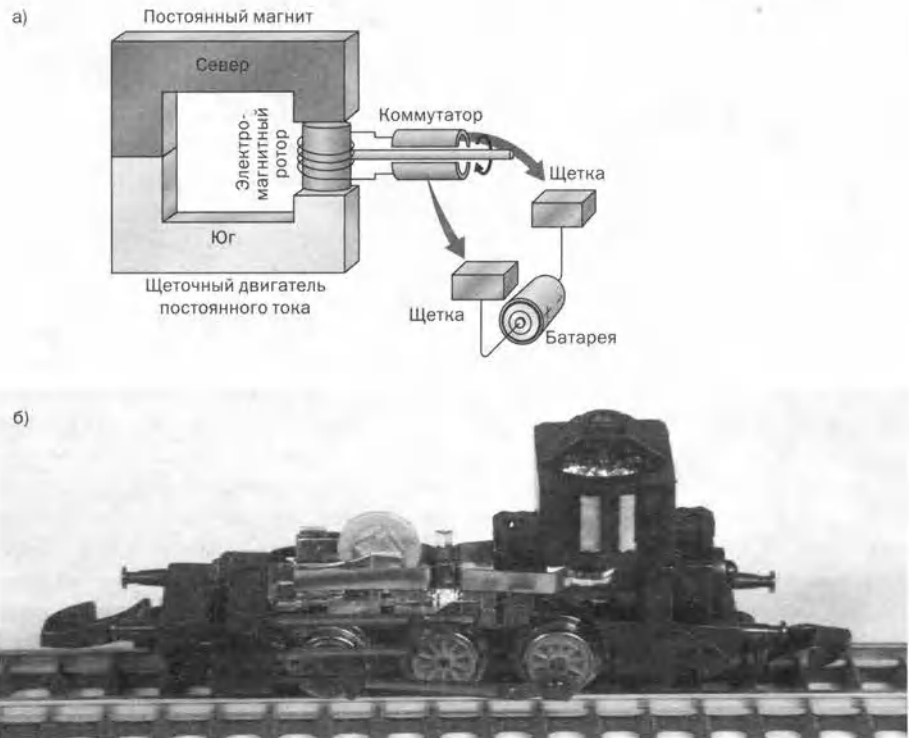
вольно дороги, зато они безопасны, бесшумны и могут благополучно работать годами, не требуя обслуживания. Вентиляторы, которые охлаждаются нашими компьютерами, приводятся в движение бесщеточными двигателями (рис. 11.3.3, б).

В щеточном электродвигателе постоянного тока электромагнитная обмотка установлена на роторе. На обмотку действует стационарный постоянный магнит (рис. 11.3.4, а). Изменение не столь уж существенное, за исключением того, что в данном случае ротор меняет свои полюсы местами всякий раз, когда они ориентируются на противоположные полюсы постоянного магнита. Но изменение это важно, потому

Рис. 11.3.4.

(а) В щеточном электродвигателе постоянного тока электромагнитный ротор вращается в поле постоянного магнита. Каждый раз, когда ротор занимает положение в соответствии с магнитным полем, его коммутатор меняет направление тока в электромагните.

(б) Этот игрушечный поезд работает на щеточном двигателе постоянного тока. Электромагнитный ротор вращается вокруг вертикальной оси над коммутатором и щетками.



что благодаря ему для перенаправления тока в обмотке двигатель может использовать простой и недорогой тип переключателя, который называется коммутатор.

Простейший коммутатор состоит из двух изогнутых пластин, которые закреплены на роторе и соединены с противоположными концами обмотки ротора. Электрический ток попадает в ротор через проводящую щетку, которая касается одной из этих пластин, и выходит из ротора через вторую щетку, которая касается другой пластины. При вращении ротора каждая щетка сначала контактирует с одной пластиной, а затем с другой. Каждый раз, когда ротор завершает половину оборота, щетки касаются пластин и магнитные полюсы ротора меняются местами. Пластины расположены таким образом, что перемена полюсов происходит точно в тот момент, когда противоположные полюсы занимают положение напротив друг друга, поэтому ротор постоянно вращается.

Щеточные двигатели постоянного тока дешевле, чем бесщеточные, однако их коммутаторы быстро изнашиваются из-за трения (рис. 11.3.4, б). Более того, несовершенство электрического контакта между щетками и пластинами приводит к искрению, поэтому щеточные двигатели не должны работать в пожароопасной среде — там, где присутствуют горючие газы или жидкости. В тех случаях, когда требуется длительная бесперебойная работа или особая пожарная безопасность, лучше использовать бесщеточные двигатели.

Двигатели постоянного тока с одной обмоткой, которые мы только что рассмотрели, бывает трудно запустить, а когда они запускаются, то могут начать вращаться в любом направлении. Чтобы обеспечить надежный запуск и вращение в заданном направлении, в большинстве двигателей постоянного тока предусмотрена несколько обмоток и, следовательно, необходима более сложная система переключения. Тем не менее такое усовершенствование делает двигатели чувствительными к общему направлению тока. При обратном включении батарей, от которых питается мотор, ток во всем двигателе тоже меняет направление, меняются местами и все полюсы электромагнитов. Поскольку постоянные магниты двигателя остаются неизменными, силы, действующие на ротор, меняются на противоположные: притяжение становится отталкиванием и наоборот. В результате двигатель вращается в обратном направлении.

## Скорость вращения и электрогенераторы постоянного тока

Мы узнали, что заставляет ротор двигателя постоянного тока вращаться, но не знаем, от чего зависит, с какой скоростью он вращается. Коль скоро двигатель плодотворно производит собственный переменный ток, не будет ли его ротор вращаться все быстрее и быстрее? Ответ на этот вопрос — нет. Ротор вращается с определенной скоростью, которая пропорциональна напряжению, подаваемому на обмотку. Первоисточник этой так называемой естественной скорости — индукция: при вращении ротора на обмотку действует ЭДС индукции, которая и ограничивает скорость вращения ротора.

Когда вы подключаете двигатель к батарее и ротор еще неподвижен, образующаяся на батарее разность потенциалов пускает ток по обмотке в направлении от высокого потенциала к низкому. Но когда ротор начинает вращаться, в обмотке появляется ЭДС индукции, которая направлена против тока. Индуцированная ЭДС растет по мере того, как увеличивается скорость вращения ротора, и в конце концов становится достаточно большой, чтобы остановить ток. Индуцированная ЭДС при этом равна напряжению батареи, и ротор продолжает вращаться с естественной скоростью.

Чем труднее для ЭДС двигателя уравниваться с напряжением батареи, тем быстрее должен вращаться ротор, чтобы достичь своей естественной скорости. Таким образом, повышение напряжения батареи, ослабление постоянного магнита двигателя и снижение числа витков в обмотке (обмотках) катушки — все эти действия будут увеличивать естественную скорость вращения двигателя.

Когда ротор достигает своей естественной скорости, двигатель препятствует любым дальнейшим изменениям скорости вращения. Если вы попытаетесь замедлить ротор, крутя его в обратную сторону, двигатель снова начнет потреблять ток от батареи. Чтобы не дать ротору замедлиться, электроэнергия постоянного тока превратится в механическую.

Если же вы попытаетесь разогнать ротор, крутя его вперед, ЭДС двигателя направит ток в противоположном направлении. При этом, чтобы предотвратить ускорение ротора, механическая энергия превратится в электрическую. Совершая работу над ротором, вы тем самым заставляете ток течь в обратном направлении через батарею, подзаряжая ее. Электродвигатель постоянного тока начинает работать как генератор!

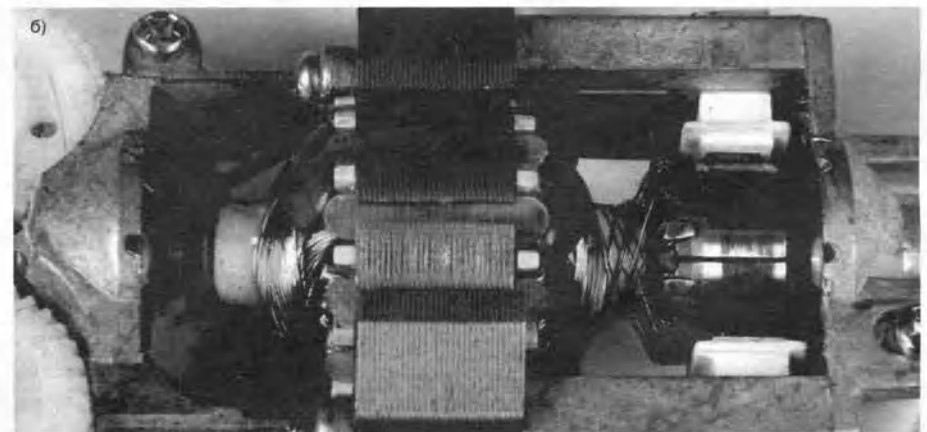
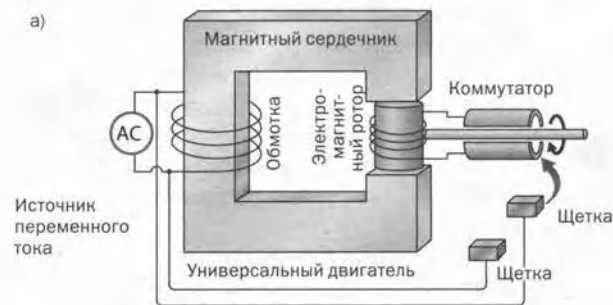
Зная, что двигатели и генераторы переменного тока, в сущности, одно и то же, мы уже не так удивимся, услышав, что двигатель и генератор постоянного тока также можно объединить в одном устройстве. Если вы совершаете работу над ротором щеточного двигателя постоянного тока, мотор будет вести себя как генератор постоянного тока. Эдисон использовал такие генераторы постоянного тока на своих электростанциях в Нью-Йорке. Бесщеточные двигатели постоянного тока более привередливы из-за своих сложных электронных переключателей, но некоторые из них тоже могут работать как генераторы постоянного тока.

## Универсальные двигатели

Если вы включите в розетку щеточный двигатель постоянного тока, его ротор будет гудеть, но не вращаться. Дело в том, что ротор пытается развернуться всякий раз, когда меняется напряжение в розетке, поэтому в итоге он не может двинуться ни туда, ни сюда.

Но если в этом двигателе заменить постоянный магнит на электромагнит и подключить этот электромагнит к тому же источнику питания, что и весь двигатель, у вас получится универсальный двигатель (рис. 11.3.5, а). Как следует из названия, этот двигатель будет нормально работать как на постоянном, так и на переменном токе.

Чтобы понять, откуда берется такая гибкость, проанализируем, что происходит, когда универсальный двигатель подключают к источнику постоянного тока. Неподвижный электромагнит не будет менять направление магнитного потока, и ротор будет вращаться так, как будто это двигатель постоянного тока. Однако есть существенное отличие: ротор универсального двигателя не начнет вращаться в обратную сторону, когда вы поменяете напряжение питания на обратное. Он будет продолжать вращаться в том же направлении, потому что разворот тока



**Рис. 11.3.5** (а) Универсальный двигатель напоминает двигатель постоянного тока, за исключением того, что в нем используются только электромагниты. Так как вращение ротора не зависит от направления тока в проводах, двигатель может работать и на постоянном, и на переменном токе. (б) Этот миксер работает на универсальном двигателе. Электромагнитный ротор (в центре) вращается внутри неподвижного электромагнита, в то время как коммутатор и щетки (справа) контролируют направление тока, протекающего через ротор.



поменяет все полюсы во всем двигателе на противоположные и, следовательно, магнитные силы двигателя не изменятся. Если вы хотите заставить универсальный двигатель вращаться в другую сторону, нужно поменять местами провода на стационарном электромагните.

Поскольку ротор может вращаться только в одном фиксированном направлении, независимо от того, в каком направлении течет ток, универсальный двигатель может работать и от сети переменного тока. Как и в электродвигателе постоянного тока, на основе которого он сконструирован, скорость вращения универсального двигателя определяется напряжением и силой тока, а не частотой переменного тока. Благодаря легкости переключения и надежности, универсальные двигатели широко применяются в таких бытовых приборах, как миксеры, блендеры и пылесосы (рис. 11.3.5, б).

## Асинхронные двигатели

Последний, самый изощренный тип двигателя, который нам предстоит рассмотреть, — асинхронный двигатель. Его ротор не является ни постоянным магнитом, ни обычным электромагнитом; это группа проводящих контуров, которые намагничиваются исключительно за счет индукции. Двигатель создает вращающееся магнитное поле, электромагнитные силы которого действуют на ротор и заставляют его вращаться вместе с этим полем.

Чтобы понять, какие силы действуют на ротор, давайте начнем с электрического контура (витка провода или рамки) в постоянном магнитном поле (рис. 11.3.6). Пока рамка неподвижна, в ней нет тока и на нее не действуют никакие силы. Но когда контур начинает вращаться в магнитном поле (рис. 11.3.6, а), на его подвижные электрические заряды начинает действовать новая сила — сила Лоренца.

Названная в честь своего первооткрывателя, голландского физика Хендрика Антона Лоренца (1853–1928), сила Лоренца действует на движущуюся заряженную частицу в магнитном поле. Эта сила толкает заряд под прямым углом и к направлению его скорости, и к направлению магнитного поля (рис. 11.3.7). Сила Лоренца пропорциональна величине заряда, скорости, магнитной индукции, а также синусу угла между скоростью и вектором индукции магнитного поля.

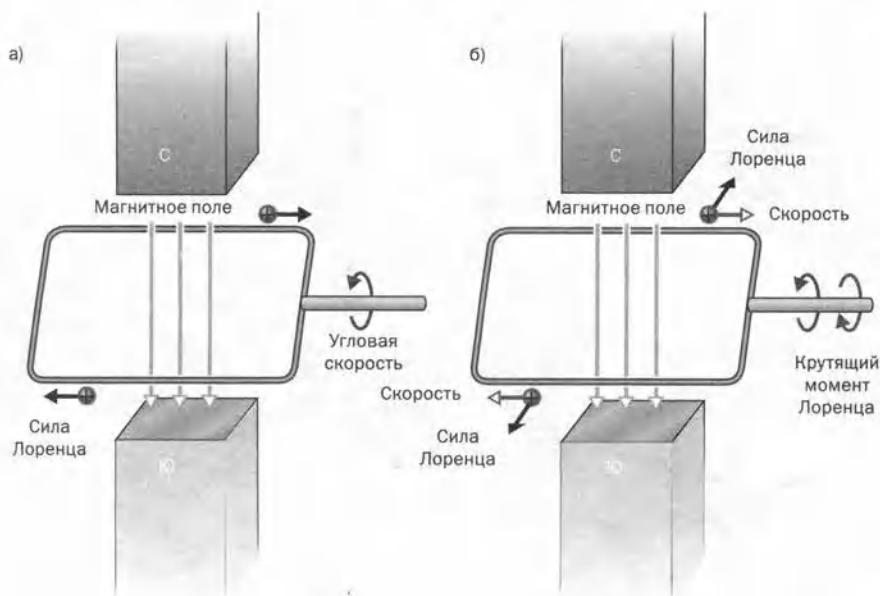


Рис. 11.3.6. (а) При вращении проводящей рамки в магнитном поле на ее подвижные заряды действуют силы Лоренца, направленные вдоль проводника. Движение зарядов по проводнику создает индукционный электрический ток, и они в виде тока начинают двигаться вдоль контура. (б) На циркулирующие заряды действуют дополнительные силы Лоренца, перпендикулярные к рамке, в результате чего возникает крутящий момент, препятствующий вращению рамки.

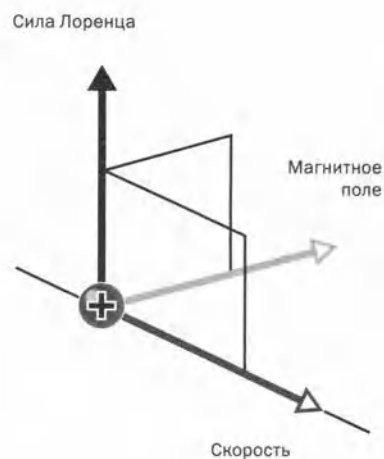


Рис. 11.3.7. На положительный заряд, движущийся в магнитном поле, действует сила, которая перпендикулярна и его скорости, и направлению магнитного поля. На отрицательно заряженную частицу действует противоположно направленная сила.

Направление силы Лоренца, действующей на положительный заряд, определяется правилом правой руки: если вытянутый указательный палец правой руки указывает скорость заряда, а согнутый средний палец — направление магнитного поля, то сила, действующая на заряд, совпадает с направлением отогнутого под прямым углом большого пальца. На отрицательный заряд действует сила, направленная противоположно. Это соотношение может быть записано следующим образом:

$$\text{сила} = \text{заряд} \times \text{скорость} \times \text{магнитная индукция} \times \text{синус угла} \quad (11.3.1)$$

где имеется в виду угол между направлениями скорости и магнитного поля, а направление силы Лоренца определяется правилом правой руки.

При вращении рамки ее подвижные заряды проходят через стационарное магнитное поле и испытывают действие сил Лоренца. Поскольку две стороны рамки движутся в противоположных направлениях относительно друг друга, силы Лоренца толкают заряды на этих сторонах в противоположные стороны вдоль контура. Заряды начинают циркулировать по контуру — возникает индукционный ток!

На заряды, движущиеся по контуру, сила Лоренца тоже действует (рис. 11.3.6, б). Она толкает заряды к краям рамки, но в противоположном направлении на ее противоположных сторонах. Поскольку заряды не могут “выпрыгнуть” за пределы проводника, они увлекают его за собой, и вся рамка испытывает крутящий момент. Крутящий момент направлен противоположно угловой скорости рамки — он стремится замедлить вращение рамки в поле. Здесь мы вновь сталкиваемся с правилом Ленца: поскольку возникновение индукционного тока в рамке обусловлено его вращением в магнитном поле, в результате индукции возникает крутящий момент, который препятствует вращению рамки.

Очевидно, что рамке трудно вращаться в присутствии стационарного магнитного поля. Но самое удивительное, что ей так же трудно не вращаться в присутствии вращающегося магнитного поля! Именно за счет этого асинхронный двигатель вращает ротор: он использует электромагниты, чтобы создать вращающееся магнитное поле, которое заставляет ротор-рамку вращаться вместе с ним. В принципе достаточно одного витка, но более эффективные роторы содержат много витков провода. Классический ротор получил название “беличье колесо” из-за сходства с игрушкой, которую ставят в клетки домашних грызунов (рис. 11.3.8).



Рис. 11.3.8. В этом разобранным асинхронном двигателе ротор типа “беличье колесо” окружен стационарными электромагнитными обмотками. Магнитное поле обмоток вращается вокруг ротора, и ротор вращается вместе с ним. Для повышения производительности двигателя сердечник ротора набирается из отдельных стальных пластин.

Хотя ротор всячески пытается поспеть за вращающимся магнитным полем, ему это не вполне удается. Если бы ротор совсем не отставал, через него не протекал бы ток и не передавался бы никакой электромагнитный момент. Но даже трение в подшипниках слегка замедляет вращение ротора. Ротор всегда вращается несколько медленнее, чем магнитное поле. И чем больше крутящий момент, который ротор передает механизму, к которому он подключен и который он вращает, тем больший электромагнитный момент ему нужен и тем медленнее он должен

вращаться, чтобы получить этот момент. При работе на максимальной расчетной мощности скорость вращения ротора асинхронного двигателя обычно на несколько процентов меньше, чем скорость вращения его магнитного поля.

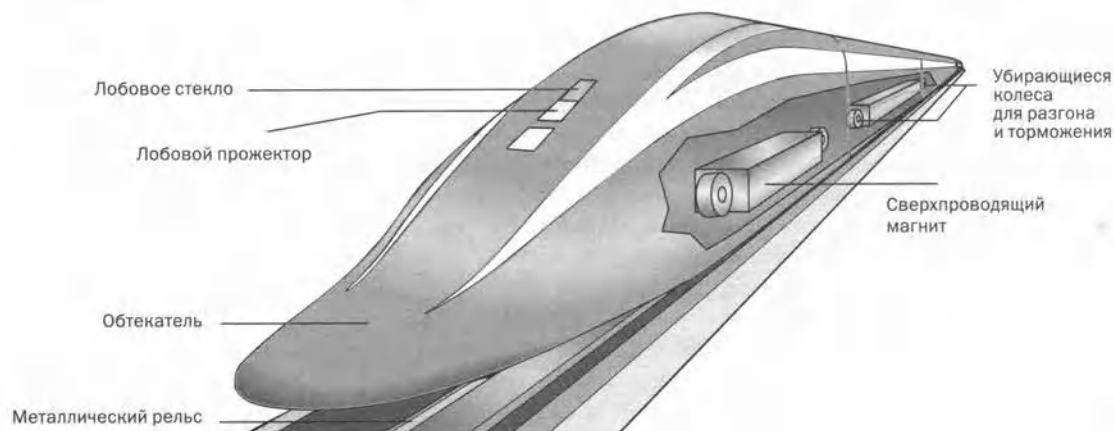
К сожалению, чтобы создать настоящее вращающееся магнитное поле, нужны очень сложные электромагниты и токи. В промышленном оборудовании они вполне обычны, но достичь такого уровня сложности в бытовой технике нелегко. Именно поэтому в большинстве бытовых асинхронных двигателей используются переменные, а не вращающиеся магнитные поля. Как ни странно, но когда ротор вращается с определенной расчетной скоростью, он реагирует на переменное магнитное поле, как на вращающееся.

Этот эффект напоминает тот, который вы, возможно, заметили, проходя вдоль ряда мерцающих праздничных гирлянд: если вы передвигаетесь с определенной скоростью, в какой-то момент вам может показаться, будто узор из огней, который вы видите, движется вместе с вами, хотя на самом деле неподвижные лампочки просто мигают. Аналогичным образом при вращении ротора в кольце электромагнитов переменного тока с определенной скоростью эффект такой, будто и магнитное поле вращается вместе с ним, хотя неподвижные электромагниты просто меняют полюсы при каждом изменении направления переменного тока.

Асинхронный двигатель, пригодный для практического применения, должен хотя бы отчасти придать переменному магнитному полю свойства вращающегося. Вращающаяся часть поля запускает ротор и разгоняет его до нужной скорости, после чего управление переходит к переменной части поля. В асинхронных двигателях, для запуска которых не требуется большого крутящего момента, достаточно намека на вращение, чтобы постепенно разогнать ротор до заданной скорости. Этот "намека" может быть создан с помощью простых электромагнитных устройств. Но если нужен большой пусковой момент двигателя, то должно быть и настоящее вращающееся магнитное поле, по крайней мере до того момента, пока ротор не достигнет установленной скорости вращения (еще одно интересное применение силы Лоренца — на рис. 11.3.9).



**Рис. 11.3.9.** В мерцающей лампе накаливания тонкая углеродная нить обвивает стержень из постоянного магнита (на фото — в нижней части, в центре). Когда по нити течет переменный ток, на него действует сила Лоренца. Поскольку ток ограничен пределами нити, сила Лоренца действует на всю нить, и нить приобретает ускорение. В результате нить плавно движется в хаотическом танце, напоминая пламя свечи.



## 11.4 Поезда на магнитной подушке

Реактивные самолеты по-прежнему остаются основным способом путешествия между отдаленными городами, но на средних дистанциях с ними успешно конкурируют современные скоростные поезда. Этот транспорт играет важную роль в транспортных системах ряда стран, особенно в Японии (поезда "Синкансэн"), Франции (TGV), Германии (ICE), Италии (TAV), Южной Кореи (KTX) и Испании (AVE). Такие поезда сегодня перевозят пассажиров со скоростью до 300 км/ч, а скоро их крейсерская скорость достигнет и 350 км/ч. Тем не менее у скорости, которую в принципе может развить обычный поезд, все-таки есть предел: она ограничена механическим взаимодействием поезда с рельсами. Сверхскоростные поезда следующего поколения будут, по всей вероятности, летать над рельсами с помощью магнитных сил.

### Зачем нужна магнитная подвеска

Принцип движения поезда почти не изменился с тех пор, как в начале XIX века появились первые железные дороги: вагоны по-прежнему катятся по рельсам, увлекаемые трением между рельсами и колесами локомотива. И хотя эта система хорошо работает при скоростях до 160 км/ч, при попытке увеличить скорость возникают две серьезные проблемы.

Прежде всего, скоростному поезду труднее удерживаться на рельсах, потому что у него слишком мало времени, чтобы отреагировать на все неровности, повороты, спуски и подъемы. Каждое изменение направления требует мгновенного ускорения и больших сил, действующих между рельсами и колесами. В общем и целом эти ускорения и силы пропорциональны квадрату скорости поезда.

Таким образом, увеличение скорости поезда, скажем, вдвое увеличивает силу, которая необходима для того, чтобы пройти поворот или какую-то неровность пути, в четыре раза. Причина в том, что при удвоенной скорости у поезда остается в два раза меньше времени, чтобы подняться на неровность, — а значит, это надо сделать вдвое быстрее. Но на то, чтобы развить эту удвоенную вертикальную скорость, у поезда тоже есть в два раза меньше времени! В результате и ускорение, и сила, прижимающая поезд и рельсы друг к другу, должны быть в четыре раза больше.

Чтобы уменьшить эти ускорения и силы, действующие на высоких скоростях, железнодорожный путь должен быть как можно более прямым и ровным, с чрезвычайно плавными, сглаженными поворотами. Но даже самые лучшие рельсы не способны полностью исключить удары колес, шум, вибрацию и механический износ. В результате и рельсы, и колеса приходится менять так часто, что при скоростях выше 350 км/ч железная дорога становится экономически нерентабельной.

Вторая проблема заключается в том, что на высоких скоростях сопротивление воздуха становится настолько сильным, что тяги между колесами локомотива и рельсами недостаточно, чтобы двигать поезд вперед. Поезд не может поддерживать такую высокую скорость исключительно за счет трения. Кроме того, на

такой скорости он не способен достаточно быстро затормозить. Поэтому из соображений безопасности скорость на обычных железнодорожных путях опять же не должна превышать 350 км/ч.

Поэтому для создания сверхскоростных поездов была разработана совершенно новая технология. Вместо того чтобы опираться на металлические колеса, эти новые поезда парят над монорельсом, поддерживаемые магнитными силами. Поскольку поезд на магнитной подвеске (такие поезда называют магнитопланами или маглевами — от слов “магнит” и “левитация”) вообще не соприкасается с рельсом, этот рельс совершенно необязательно должен быть очень гладким. Поезд летит вперед на воздушной магнитной подушке.

Традиционные для транспортных средств двигатели в случае маглева не годятся, потому что у этих поездов нет ни колес, ни трения. Вместо этого поезд на магнитной подушке для движения вперед и торможения использует дополнительные магниты на рельсе и на самом поезде. В сущности, маглевы как бы “разворачивают” электродвигатели (и генераторы), которые мы рассмотрели в предыдущем разделе, чтобы приспособить их для линейного, а не вращательного движения. Устройства подобного рода так и называются — линейные двигатели.

## Как приподнять поезд с помощью магнитных сил

Вместо того чтобы катиться по рельсам на колесах, маглев парит над рельсом на магнитной подвеске. Магниты в поезде и рельсе воздействуют друг на друга и поддерживают поезд над рельсом без непосредственного контакта между ними. Но какой бы простой и понятной ни казалась эта идея, воплотить ее непросто. Чтобы понять, в чем тут сложность, давайте начнем с самого простого: как стратегически правильно расположить постоянные магниты.

Если вы помните, в начале этой главы мы говорили о том, что магнитные полюсы всегда существуют в виде равных, но противоположных пар. Похоже, что в нашей Вселенной все-таки нет каких-либо магнитных монополей — нет чисто северного или чисто южного полюсов. Так что единственное, что вы можете сделать с постоянным магнитом, — это получить магнитный диполь: магнит с северным полюсом на одном конце и южным полюсом на другом.

Силы, действующие между магнитными диполями, могут быть на удивление мощными. Если покрыть верхнюю часть рельса и нижнюю часть поезда дипольными магнитами, повернутыми так, чтобы их одноименные полюсы смотрели друг на друга, поезд и рельс будут яростно отталкиваться друг от друга. Это отталкивание тем сильнее, чем ближе магниты друг к другу, и на некотором расстоянии эта отталкивающая сила превысит вес поезда. Тогда поезд потеряет направленное вниз ускорение и может парить над рельсом на магнитной подушке. Это и есть магнитная левитация.

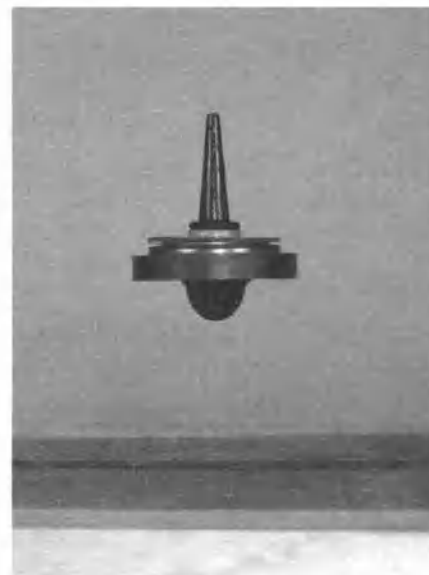
К сожалению, у этой простой схемы есть, по крайней мере, два недостатка. Прежде всего, магнитный рельс будет притягивать к себе всякий магнитный мусор — старые стальные банки, гайки, болты, железные опилки, — и его очистка превратится в непрерывный кошмар. Но что гораздо важнее — магнит, подвешенный над другим магнитом, статически неустойчив (**рис. 11.4.1**). Поезд будет норовить соскользнуть в сторону от рельса и скоро окажется на земле — так же как стеклянный шарик, если его положить на вершину полукруглого купола, рано или поздно скатится вниз. Какое-то время поезд может парить на своей магнитной подушке, но без дополнительной поддержки это продлится недолго. Правда, существует несколько экзотических схем, в которых достигается динамическая (т. е. в движении) устойчивость парящих постоянных магнитов (**рис. 11.4.2**), но эти схемы непригодны для поездов на магнитной подушке.

## Устойчивость и обратная связь

Итак, поезд, который поддерживают постоянные магниты, может находиться в равновесии — когда результирующая сила, действующая на него, равна нулю, — но это равновесие всегда будет неустойчивым. Если равновесие устойчивое, то после его нарушения тело испытывает действие возвращающей силы, которая снова приводит его в состояние равновесия (**рис. 11.4.3, а**). Но, как я уже объяснял в разделе 4.1 на примере велосипедов, в случае нарушения неустойчивого



**Рис. 11.4.1.** Два магнитных диска отталкиваются, потому что обращены друг к другу северными полюсами. Однако чтобы верхний диск не упал с магнитной подушки, которая его поддерживает, необходима ось.



**Рис. 11.4.2.** Вращающийся магнитный волчок парит над отталкивающим его магнитом, спрятанным под деревянным покрытием. Динамическая устойчивость волчка основана на гироскопическом эффекте, но для поезда на магнитной подвеске это не подходит.

Рис. 11.4.3. (а) На шарик, выведенный из состояния устойчивого равновесия, действует возвращающая сила, которая толкает его назад в положение равновесия. (б) Шарик, выведенный из состояния неустойчивого равновесия, в него не возвращается.

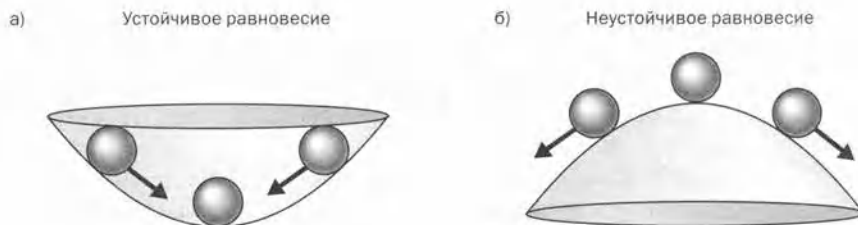


Рис. 11.4.4. Если для "подвешивания" поезда использовать только отталкивание постоянных магнитов, то поезд сохранит устойчивость по вертикали, но будет неустойчивым по горизонтали. Без идеальной центровки силы отталкивания будут смещать поезд в ту или иную стороны, пока он не сойдет с пути.



Рис. 11.4.5. Электромагнит поддерживает в подвешенном состоянии магнитный шарик под ним. Фотоэлемент следит за положением шарика и соответствующим образом регулирует силу электромагнита, чтобы шарик продолжал парить на постоянной высоте.

равновесия на тело действуют силы, направленные таким образом, что тело еще сильнее отклоняется от состояния равновесия (рис. 11.4.3, б).

Наблюдение, известное как теорема Ирншоу, утверждает, что ни при каком расположении электрические заряды не могут находиться в устойчивом равновесии, если на них действуют только электростатические силы. Аналогичным образом никакое расположение магнитных полюсов не может быть состоянием устойчивого равновесия, если на них действуют только магнитостатические силы. Как бы вы ни старались, при любом расположении постоянных магнитов на поезде и рельсе поезд будет находиться в состоянии неустойчивого равновесия.

Подобно тому, как попытки изобрести вечный двигатель обречены на провал согласно первому и второму законам термодинамики, попытки изобрести устойчивую магнитную подушку, которая была бы основана только на постоянных магнитах, обречены на провал согласно теореме Ирншоу. Хотя на первый взгляд может показаться, что возможно некое хитроумное расположение постоянных магнитов, которое придаст поезду устойчивость, никакого способа обойти теорему Ирншоу не существует.

Простой пример на рис. 11.4.4 показывает, что отталкивание между магнитами может удерживать поезд на постоянной высоте, но любое движение поезда вбок неустойчиво. Если поезд хоть чуть-чуть отклонится от положения ровно над центром рельса, силы отталкивания сместят его в сторону и он упадет со своей магнитной подушки.

Единственный способ сделать поезд устойчивым и держать его строго по центру рельса — это использовать магниты, которые можно регулировать (включать и выключать) таким образом, чтобы они всегда толкали поезд обратно к центру, если он начнет падать. Электромагниты способны выполнить эту задачу, потому что их магнитные поля создаются электрическими токами и их можно включать и выключать простым изменением этих токов. Чтобы сделать электромагнит еще сильнее, его обмотку обычно наматывают на сердечник из железа и других магнитных материалов, которые при намагничивании усиливают поле обмотки.

Чтобы поддерживать устойчивость поезда, система управления должна следить за положением поезда и соответствующим образом регулировать электромагниты. Использование информации о ситуации для того, чтобы управлять изменением этой ситуации, называется обратной связью. Обратная связь часто используется в технике для стабилизации неустойчивых систем и оптимизации отклика системы на внешние раздражители (рис. 11.4.5). При помощи обратной связи можно успешно создавать возвращающие силы там, где они не возникают естественным образом.

В настоящее время на стадии разработки или испытания находятся некоторые системы маглевов, которые используют магнитное подвешивание со стабилизированной обратной связью (рис. 11.4.6). В большинстве из этих систем вес поезда поддерживается силами притяжения между противоположными полюсами. Система управления тщательно контролирует электромагниты, чтобы расстояние между этими полюсами было постоянным. Однако задача оказалась весьма непростой: программы обратной связи требуют чрезвычайно сложных систем управления, при разработке которых нужно преодолеть множество препятствий, как теоретических, так и технических. Тем не менее в области магнитной подвески уже достигнут определенный прогресс, и существует высокая вероятность того, что уже в ближайшее десятилетие или два маглевы, управляемые обратной связью, будут перевозить пассажиров по земле со скоростью авиалайнеров.



## Магнитная подвеска с использованием переменного тока

Существует, однако, и другая магнитная технология, которая может обеспечить левитацию поезда и возвращающие силы, действующие во всех направлениях, — но без системы управления или обратной связи. Чтобы придать проводящим поверхностям временные магнитные свойства, необязательно устанавливать и на поезд, и на рельс постоянные магниты или электромагниты — можно использовать электромагнитную индукцию. В этом случае проводящий рельс подвергается воздействию переменного магнитного поля, которое индуцирует в нем электрический ток. Поскольку индукционный ток обладает магнитными свойствами, поезд и рельс прижимаются друг к другу за счет магнитостатических сил. Правильно рассчитанные магнитостатические силы могут обеспечить устойчивую левитацию поезда.

Простейший способ “подвесить” поезд с помощью электромагнитной индукции — это установить в поезде электромагнит и подключить его к батарее (рис. 11.4.7, а). Так как электромагнит будет действовать в качестве индуктора, протекающий через него ток будет расти постепенно, и его магнитное поле тоже будет расти равномерно. Находящийся поблизости рельс будет испытывать действие как увеличивающегося магнитного поля, так и возникшего электрического поля (напомним, что изменяющееся магнитное поле создает электрическое поле). Под действием этого электрического поля по рельсу пойдет ток, и рельс станет магнитным.

В соответствии с правилом Ленца, магнитное поле рельса будет противостоять увеличению магнитного поля поезда. Поезд и рельс будут отталкиваться друг от друга, и поезд начнет парить над рельсом. Если рельс выполнить в виде желоба и установить под поезд электромагнит соответствующей формы, то можно получить устойчивое подвешивание. Такой поезд будет находиться в состоянии устойчивого равновесия и не упадет с магнитной подушки!

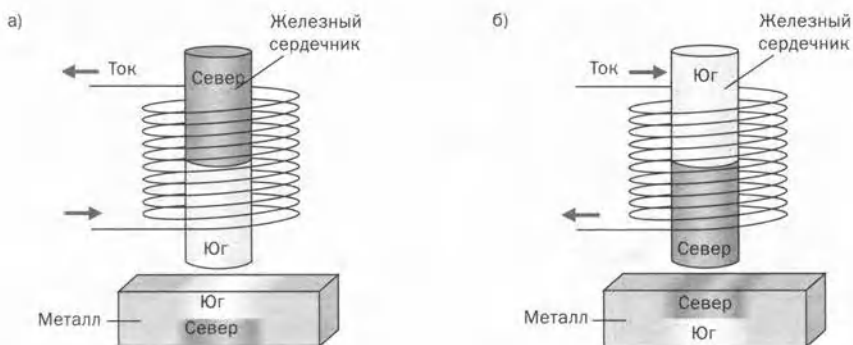


Рис. 11.4.6. Этот поезд на магнитной подвеске поддерживается силами притяжения между магнитами, расположенными на рельсе, и магнитами в тех частях вагона, которыми он обхватывает рельс. Устойчивость системы обеспечивается обратной связью.

Рис. 11.4.7. (а) Когда электромагнит поворачивается южным полюсом вниз, его растущее магнитное поле индуцирует ток в расположенном под ним металле. Металл становится магнитным, его южный полюс обращен вверх, поэтому он отталкивает электромагнит. (б) Когда направление тока в электромагните меняется на противоположное, все полюсы меняются местами и металл по-прежнему отталкивает электромагнит.

К сожалению, и в данном случае есть проблема. Электропроводность рельса не идеальна, поэтому для поддержания тока и собственного магнетизма рельсу всегда нужно электрическое поле. А так как это электрическое поле создается изменяющимся магнитным полем поезда, следовательно, магнитное поле поезда не может перестать изменяться, иначе поезд упадет!

В нашем упрощенном примере магнитное поле поезда равномерно росло, потому что батарея постепенно пропускала через электромагнит-индуктор все больше тока. Но это не может продолжаться до бесконечности. В конце концов через электромагнит начнет проходить больше тока, чем он может выдержать, и магнит загорится. К счастью, есть решение: надо периодически менять направление тока (рис. 11.4.7, б). В соответствии с правилом Ленца, индуцированный магнетизм рельса будет направлен против любого производящего его изменения, поэтому подключение электромагнита поезда к источнику переменного тока будет постоянно поддерживать отталкивание поезда и рельса.

Ученые и инженеры уже используют магнитную левитацию с переменным током, подвешивая поезда над рельсом-желобом. В некоторых случаях электромагниты устанавливают на локомотив, в других — на рельс. Обе эти схемы неплохо работают, однако токи в металлических поверхностях и электромагнитах сталкиваются с электрическим сопротивлением, в результате чего часть электрической энергии преобразуется в тепловую. Таким образом, необходимо постоянно пополнять запас электрической энергии, и в результате маглевы такого типа получаются слишком энергоемкими, чтобы быть эффективными.

## Электродинамическая подвеска

Более практичной оказалась схема электродинамического подвешивания, в которой поезд, на котором установлены постоянные магниты, быстро движется над проводящим рельсом. По мере движения магнитов магнитное поле в рельсе меняется, и внутри рельса возникает электрическое поле. Это электрическое поле возбуждает в рельсе электрический ток, и рельс становится магнитным. Магнитные полюсы рельса отталкивают полюсы поезда, благодаря чему поезд начинает парить на подушке из магнитных сил (рис. 11.4.8).

Электродинамическая подвеска лучше всего работает, когда поезд движется очень быстро и его магниты быстро проходят над каждой областью рельса. Причина в том, что магнитные полюсы, которые возникают в рельсе, не просто поддерживают поезд, они также отталкивают его назад, когда он приближается к магниту, и толкают вперед — когда он удаляется от магнита. Толчок вперед особенно важен, потому что без него поезд бы постепенно замедлял ход.

Индукция тока в рельсе, поезд вкладывает энергию в магнитное поле рельса и ощущает эту передачу энергии в виде противодействующей силы — растущее магнитное поле рельса совершает отрицательную работу над приближающимся поездом. Но затем, как только поезд начинает выходить за пределы данного намагниченного участка рельса, поезд забирает энергию из магнитного поля рельса, что проявляется действием силы, толкающей поезд вперед. Таким образом, уменьшающееся магнитное поле рельса совершает положительную работу над удаляющимся поездом.

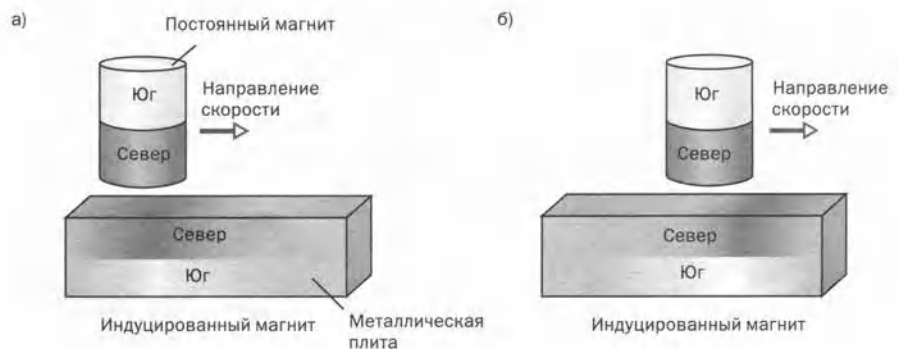


Рис. 11.4.8. Когда постоянный магнит быстро движется над металлической поверхностью, он индуцирует в ней электрический ток. Металл намагничивается и отталкивает движущийся постоянный магнит. Намагниченная область перемещается параллельно постоянному магниту.



Сила этого толчка вперед зависит от скорости поезда. Если поезд движется быстро, магнитные полюсы рельса будут толкать его вперед при удалении почти с такой же силой, с какой они толкали его назад при приближении. Но если поезд движется слишком медленно, у токов в рельсе будет достаточно времени для затухания из-за электрического сопротивления, и рельс успеет потерять значительную часть магнетизма, пока поезд еще не удалился. А поскольку поезд, удаляясь от данного участка, получит лишь слабый толчок, его ход замедлится и часть его энергии будет потеряна в виде переданной рельсу тепловой энергии.

Даже при высоких скоростях на поезд действует результирующая сила, противоположная направлению движения. Эта сила, которую называют магнитным торможением, равна сумме двух противоположно направленных магнитных сил, действующих на поезд по ходу и против движения. Новые и свежие полюсы, возникающие в рельсе по ходу движения поезда, относительно сильны. Остающиеся позади полюсы, над которыми уже прошел магнит поезда, слабее, потому что возникли раньше и токи, которые их создали, уже потеряли часть энергии. В результате толчок от полюса, расположенного впереди поезда, сильнее, чем толчок от оставшегося позади, и на поезд действует направленная назад результирующая сила.

Сила магнитного торможения максимальна при скорости около 30 км/ч — минимальной скорости начала левитации, затем по мере увеличения скорости она постепенно уменьшается. Чем быстрее идет поезд, тем меньше времени есть у полюсов в рельсе, чтобы терять энергию, и тем в большей степени действующие на поезд по ходу и против движения магнитные силы уравниваются друг друга. При скоростях, превышающих 300 км/ч (190 миль/ч), магнитное торможение становится несущественным по сравнению с обычной силой сопротивления воздуха.

Понятно, что электродинамическая подвеска не может поддерживать поезд, когда он стоит, поэтому маглевам нужны выдвижные шасси для опоры во время отправления или остановки. Поезд отъезжает от станции на колесах, набирает скорость, а затем “взлетает” на магнитную подушку. На период высокоскоростного движения он убирает шасси и вновь выпускает их перед “посадкой”, приближаясь к следующей остановке.

Оборудованный соответствующими постоянными магнитами поезд на электродинамической подвеске может парить над алюминиевым рельсом на высоте более чем 15 см. Он легко преодолевает небольшие неровности и обеспечивает необычайно плавный ход. Небольшие дефекты рельсов вообще не ощущаются пассажирами.

Недавние технологические разработки в области постоянных магнитов сделали их значительно менее дорогими и при этом более мощными, так что теперь возможны даже поезда на электродинамической подвеске, которым не нужны электромагниты ни в поезде, ни в рельсе. Если поезд будет двигаться вперед с достаточной скоростью, он и так будет левитировать. Изобретение магнитной сборки Хальбаха (рис. 11.4.9) — особой конфигурации постоянных магнитов, которые сосредотачивают сильное магнитное поле с одной стороны, в то время как с другой оно практически отсутствует, — дало возможность направлять магнитное поле только на рельс. Это важно для пассажиров, которые не хотят, чтобы с их кредитных карт стиралась информация или чтобы металлические предметы выпрыгивали у них из карманов. Рельс со встроенными в него специальной формы обмотками может легко поддерживать поезд, оснащенный магнитами Хальбаха.

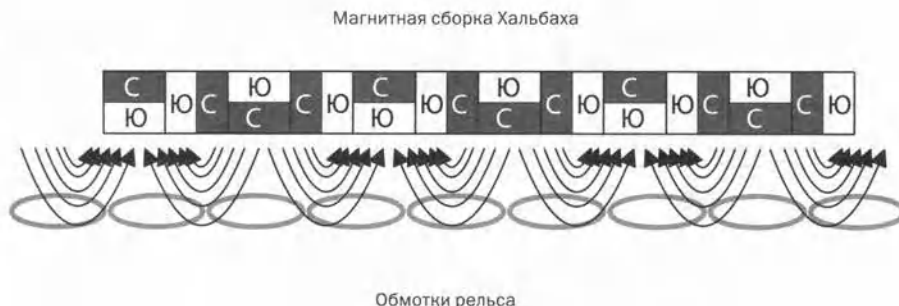


Рис. 11.4.9. Постоянные магниты, собранные в соответствии с принципом Хальбаха и установленные на днище вагона, направляют сильное переменное магнитное поле на обмотки рельса специальной конструкции. Когда поезд движется над рельсом, магниты возбуждают ток в обмотках рельса, вследствие чего поезд и рельс с силой отталкиваются друг друга. В результате поезд парит над рельсом.

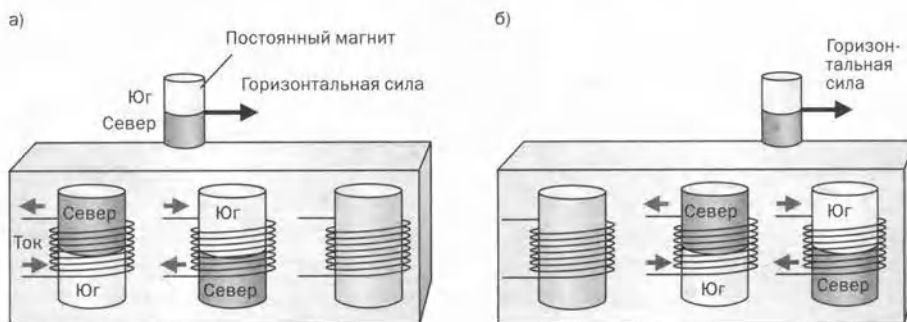
Альтернатива постоянным магнитам — это сверхпроводящие электромагниты, то есть провода, изготовленные из материалов, которые обладают идеальной электропроводностью при температурах, близких к абсолютному нулю. Поскольку сверхпроводник не имеет электрического сопротивления, ток, закачанный в него при изготовлении или обслуживании, будет течь через него до бесконечности. Тогда сверхпроводник начинает вести себя как легкий постоянный магнит чрезвычайной силы. Единственное, что нужно для того, чтобы сверхпроводящие магниты могли легко держать на весу маглев и при этом расходовать минимум электроэнергии, — это сохранять их холодными.

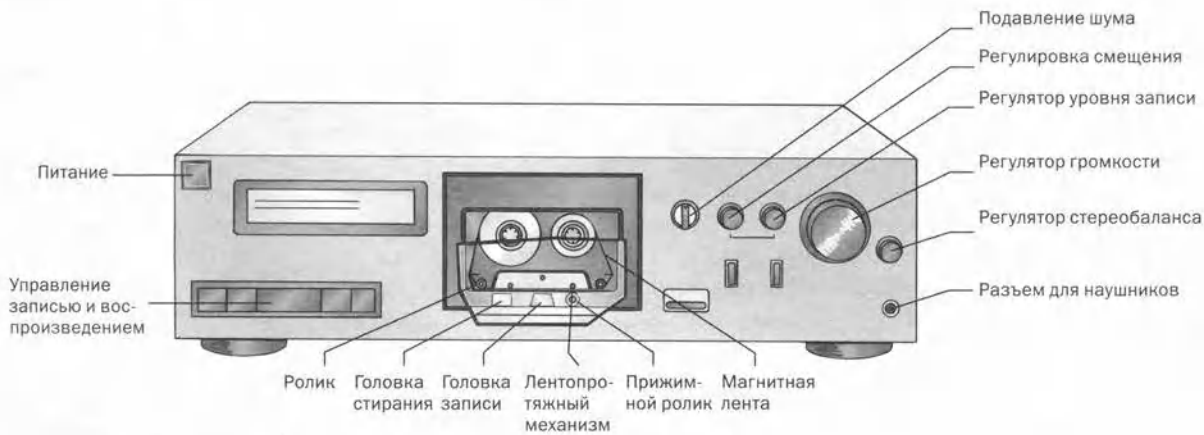
## Тяга и линейные двигатели

Независимо от способа подвешивания, маглев все равно нуждается в устройстве, которое будет толкать поезд вперед. Это мог бы быть двигатель с пропеллером или реактивный двигатель, но в большинстве поездов на магнитной подвеске используется еще одна новая магнитная концепция: линейный двигатель. Линейный двигатель достаточно сложно построить на практике, хотя он и прост в теории. Похожий на развернутый синхронный двигатель, он использует силы притяжения или отталкивания между электромагнитами рельса и поезда, чтобы толкать поезд вперед. Эти магниты включаются и выключаются в определенной последовательности, так что сила, действующая на поезд, всегда направлена вперед (рис. 11.4.10).

Помимо продвижения поезда вперед, линейные двигатели играют роль тормозов. Изменяя последовательность включения электромагнитов, можно изменить направление действия на поезд горизонтальной силы и превратить линейный двигатель в линейный генератор. Линейный двигатель может остановить поезд гораздо эффективнее, чем традиционные тормоза, использующие трение скольжения, к тому же одновременно он может генерировать электроэнергию. Линейный двигатель преобразует электрическую энергию в кинетическую, когда поезд движется с ускорением вперед, а кинетическую — в электрическую, когда поезд замедляет ход, чтобы остановиться.

**Рис. 11.4.10.** Работа линейного двигателя основана на периодическом включении-выключении электромагнитов в определенное время. На движущийся постоянный магнит действует горизонтальная сила (показанная на рисунке стрелкой вправо). (а) — активна левая пара электромагнитов; (б) — активна правая пара электромагнитов. При изменении направления тока через обмотку меняются местами полюсы в среднем магните.





## 11.5 Магнитная запись

История магнитной записи длинна и разнообразна. Первоначально она была изобретена для записи звука, и носителем сначала служила стальная проволока, а затем лента на полимерной основе со специальным покрытием. С развитием телевидения магнитную запись приспособили для хранения видеоинформации на полимерных лентах, а когда компьютерам потребовалось хранить все большие объемы цифровой информации, магнитная запись снова была тут как тут. Но несмотря на эту эволюцию, основные принципы магнитной записи не очень-то изменились со времен проволочных самописцев и катушечных магнитофонов.

### Магнитная звукозапись: представление звука

Давайте начнем с магнитной записи звука. Но прежде чем рассказывать, как звуковая информация может быть записана, а потом воспроизведена с магнитной ленты, я должен вкратце объяснить, что такое звуковая информация и как вообще она может отображаться.

Вспомним, что звук представляет собой сжатия и разрежения воздуха. Эти нарушения равновесного состояния воздуха распространяются от источника со скоростью примерно 331 м/с. В области сжатия плотность и давление воздуха несколько выше средних значений, а в области разрежения — ниже. Когда эти колебания плотности достигают вашего уха, вы слышите звук.

Если некий прибор достаточно детально и часто измеряет колебания плотности и точно фиксирует записи этих измерений в какой-то сохраняемой форме, он соберет достаточно информации, чтобы впоследствии воспроизвести первоначальный звук. Если прибор затем использует эту звуковую информацию для воссоздания колебаний плотности и вы прослушаете эти колебания, то услышанное будет очень похоже на то, что вы слышали изначально.

Магнитное звукозаписывающее устройство — магнитофон — хранит и извлекает звуковую информацию. Но для записи звуковой информации нужен микрофон, а для воспроизведения — динамики. Микрофон чувствителен к изменению давления: производимый микрофоном электрический ток пропорционален отклонениям местного давления воздуха от его среднего значения. Когда давление воздуха выше среднего, ток через электрическую цепь микрофона течет в одном направлении, а когда давление воздуха ниже среднего — в противоположном. Электрический ток, являясь формой представления звука, его кодированным эквивалентом, передает эту звуковую информацию магнитофону.

Задача магнитофона — отобразить звук на магнитной ленте. При воспроизведении магнитофон извлекает с ленты звуковую информацию и формирует электрический ток, представляющий этот звук. После усиления этот ток проходит через динамик — устройство, меняющее давление воздуха пропорционально силе протекающего через него тока. Возмущения давления и плотности, вызванные динамиком, распространяются по воздуху, и когда они доходят до вашего уха, вы слышите их как воспроизведение исходного звука.

Магнитная лента представляет собой тонкую полимерную полосу, покрытую с одной стороны пленкой из крошечных постоянных магнитов. Каждый из этих постоянных магнитов имеет на одном конце северный магнитный полюс, на другом — южный. Во время записи сильное магнитное поле может менять полюсы этих частиц; все эти изменения в ленте магнитофон идентифицирует во время воспроизведения. Это контролируемое изменение ленты вкупе с идентификацией изменений при воспроизведении и лежит в основе магнитной записи (в первых звукозаписывающих устройствах еще не использовалась лента, см. ❶).

❶ В 1898 г. датский инженер и изобретатель Вальдемар Поульсен (1869–1942), работавший в то время инженером-исследователем в телефонной компании Копенгагена, придумал способ записывать звук при помощи намагничивания стальной проволоки. В самом первом варианте магнитофона проволока была туго натянута по всей его лаборатории, а устройствами записи и воспроизведения служили тележки, которые катались по проволоке. Записывающая тележка намагничивала проволоку для записи звука, а воспроизводящая тележка измеряла намагниченность и воспроизводила звук. Для записи Поульсену приходилось бежать рядом с “пишущей” тележкой и кричать в микрофон. Затем по проводу двигалась воспроизводящая тележка, и он мог прослушать собственный голос в записи.

Как мы уже говорили при обсуждении бытовых магнитов на с. 375, постоянные магниты изготавливают из твердых магнетиков — материалов, которые могут быть намагничены внешним магнитным полем и сохраняют свою намагниченность даже после исчезновения такого поля. Поэтому имеет смысл использовать постоянные магниты для хранения информации: если намагнитить материал, он останется намагниченным, и эту намагниченность можно использовать для представления информации.

Тем не менее не все твердые магнетики имеют одинаковые свойства. Постоянные магниты, которые используются в полимерных магнитных лентах, отличаются от гибких пластиковых магнитов на холодильнике как минимум двумя характеристиками: типами магнитного порядка и размерами. Начнем с магнитного порядка.

Как я уже говорил в начале данной главы, несмотря на то что большинство атомов являются магнитными, большинство твердых тел — нет. Причина в том, что, когда атомы взаимодействуют друг с другом и образуют связи, чтобы создать твердое вещество, они стремятся полностью свести на нет атомный магнетизм. Только некоторым твердым веществам удается избежать полного уничтожения магнетизма и сохранить свои магнитные свойства на атомном уровне. Такие магнитные материалы и являются основой для магнитной записи.

Существуют три основных класса твердых магнитных веществ: ферромагнетики, антиферромагнетики и ферримагнетики, различающиеся структурой, упорядочивающей расположение магнитных атомов (рис. 11.5.1). Железо, кобальт, никель и диоксид хрома — ферромагнетики, в которых магнитные диполи всех атомов выстраиваются параллельно. Хром — антиферромагнетик: направление магнитных диполей в этом металле чередуется или постепенно изменяется, но диполи полностью уравнивают друг друга. Феррит железа (гамма-оксид железа) и феррит бария являются ферримагнетиками. Магнитные диполи в их структуре чередуются, но не компенсируются полностью, так как имеют различную величину.

Для изготовления постоянных магнитов можно использовать как ферромагнетики, так и ферримагнетики. Обычные гибкие пластиковые магниты, как правило, содержат ферриты бария, которые относятся к ферримагнитным материалам. Но в большинстве полимерных магнитных лент применяют покрытия из железа или других ферромагнетиков. Такое разделение обусловлено не фундаментальными причинами, а практическими и технологическими соображениями.



Рис. 11.5.1. (а) В ферромагнетиках атомы-магниты выстроены параллельно и смотрят в одну сторону. (б) В антиферромагнетиках магнитные диполи полностью компенсируют друг друга. (в) В ферримагнетиках имеет место частичная компенсация.

С другой стороны, очень большое значение имеет размер частиц. У больших частиц феррита бария, которые служат основой гибких пластиковых магнитов, структура домена такая же, какую я описал на с. 377. При намагничивании этих частиц происходит рост всех доменов, имеющих “правильное” направление, и сокращение тех, которые направлены в другие стороны. Поскольку домены феррита бария с трудом меняют размеры, это вещество относительно сложно намагнитить. Однако, будучи однажды намагниченным, оно остается таким навсегда.

В устройствах магнитной записи используют другой тип твердых магнитных материалов — микроскопические игольчатые частицы гамма-оксида железа, диоксида хрома, оксида железа с кобальтовым покрытием или чистого железа. Каждая из этих частиц настолько мала, что содержит только один магнитный домен (рис. 11.5.2). На одном конце у нее северный полюс, на другом — южный, потому что структура позволяет противоположным полюсам соседних магнитных атомов располагаться так близко друг к другу, как только возможно, и минимизирует общую магнитную потенциальную энергию частицы. Когда намагниченность направлена по длине частицы цилиндрической формы, частица находится в состоянии устойчивого магнитного равновесия; если попытаться изменить направление намагниченности, начинают действовать возвращающие силы, которые обеспечивают восстановление равновесного направления!

Каждая из таких частиц — крошечный постоянный магнит, который не может быть размагничен. Он намагничен всегда в том или ином направлении вдоль своей длины. Однако магнитные полюсы частицы, попав в сильное магнитное поле, могут меняться местами. Сама частица не будет разворачиваться, меняются местами только магнитные полюсы. Это свойство делает частицы идеальным носителем магнитной записи. Во время записи магнитофон выбирает для частицы определенную ориентацию, которая сохраняется очень и очень надолго.

Магнитную ленту изготавливают, нанося на основу из полимерной пленки смесь магнитных частиц, связующего вещества и растворителя. После покрытия влажная пленка немедленно проходит через сильное магнитное поле, которое ориентирует все микроскопические магнитные частицы вдоль направления движения ленты. Затем ленту сушат и прессуют, чтобы магнитное покрытие было плотным, гладким и блестящим. Толщина готового магнитного покрытия составляет около 5 микрон в лентах для аудио- и видеокассет и 10 микрон в катушечных лентах. Но фактически для записи используется только наружный слой покрытия толщиной примерно в один микрон.

Магнитные частицы делят на классы в зависимости от силы магнитного поля, необходимой для обмена магнитных полюсов. Магнитные ленты лучшего качества получаются из частиц, более устойчивых к перемене магнитных полюсов, так как они меньше подвержены влиянию случайных магнитных полей. Обычно способность сопротивляться перемене полюсов измеряется в эрстедах\*, причем более высокая величина означает большее сопротивление. Из таблицы 11.5.1 следует, что самые лучшие ленты получаются при использовании частиц железа. Железо в массе — мягкий магнитный материал с магнитными доменами, с легкостью меняющими размер, однако вытянутые однодоменные частицы железа, имеющие игольчатую форму, — чрезвычайно твердый магнитный материал. Именно такие частицы используются для изготовления магнитных лент.

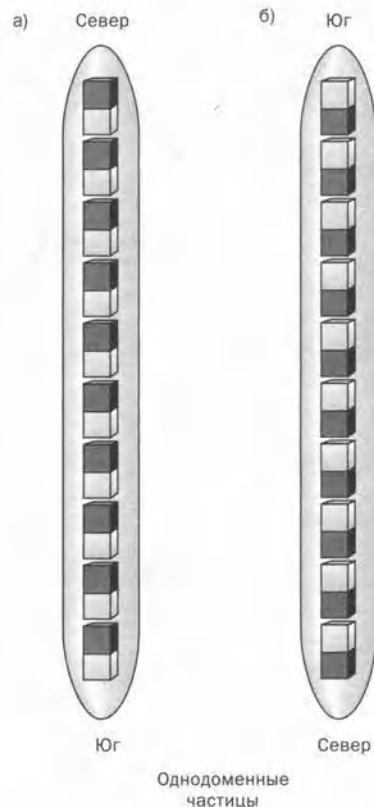
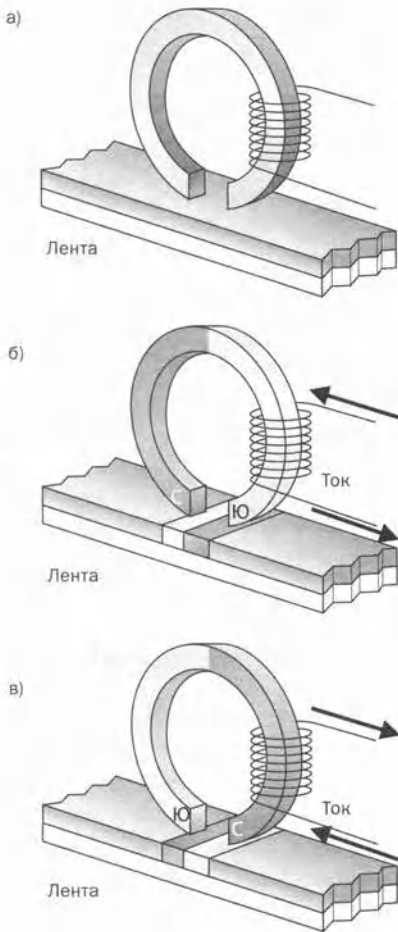


Рис. 11.5.2. Каждая микроскопическая удлиненная частица представляет собой один магнитный домен, который ориентируется вдоль продольной оси. Такую магнитную ориентацию трудно изменить, поэтому только сильное магнитное поле может превратить (а) в (б) и (б) в (а), при этом не поворачивая сами частицы.

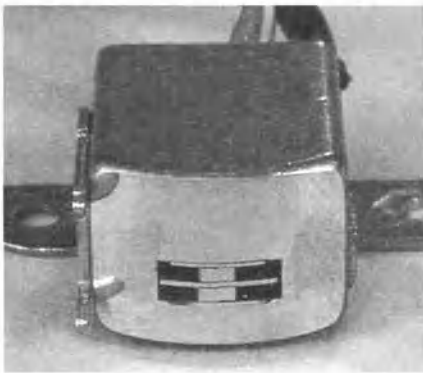
\* Единица измерения напряженности магнитного поля в системе единиц СГС, часто применяемой в физике. 1 эрстед = 79,58 А/м.

Таблица 11.5.1. Характеристика частиц, обычно используемых в магнитных лентах

Тип магнитной частицы	Сопротивление инверсии полюсов (коэрцитивная сила)
Гамма-оксид железа ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ )	300 эрстед
Диоксид хрома ( $\text{CrO}_2$ )	450 эрстед
Кобальт-модифицированный гамма-оксид железа	600 эрстед
Железо	1500 эрстед



**Рис. 11.5.3.** (а) Записывающая головка магнитофона представляет собой разомкнутое кольцо из мягкого магнитного материала с небольшим зазором и проводящей обмоткой. Когда по обмотке течет ток (б, в), кольцо временно намагничивается и постоянно намагничивает любой твердый магнетик, находящийся вблизи зазора кольца.



**Рис. 11.5.4.** В головке стереомагнитофона имеются два кольца из мягкого железа (блестящие прямоугольники над и под горизонтальной разделительной линией). Вертикальные зазоры в этих кольцах настолько малы, что их можно увидеть только под микроскопом. Головка записывает и воспроизводит два отдельных канала.

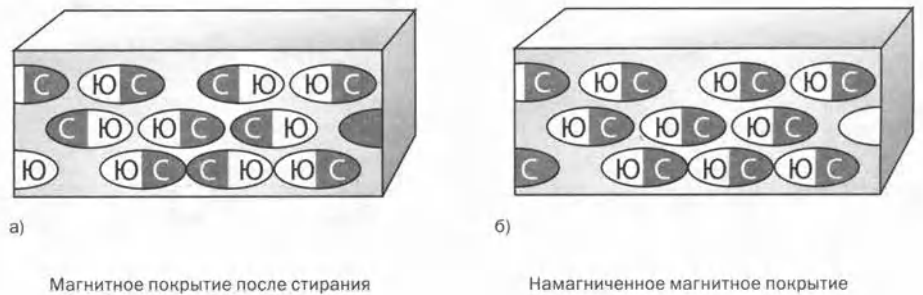
Теперь мы готовы разобраться в том, как именно магнитофон записывает звуковую информацию на магнитную ленту. Это делается с помощью миниатюрного электромагнита в записывающей головке — крошечного колечка из мягкого магнитного материала с намотанной на него проводящей обмоткой (рис. 11.5.3 и 11.5.4). Когда через обмотку течет ток, магнитное поле обмотки временно намагничивает кольцо.

Кольцо на самом деле не замкнутое: на нем есть маленький зазор в том месте, где оно соприкасается с магнитной лентой (рис. 11.5.3, а). Когда ток по обмотке течет в одну сторону, северный полюс находится на левом конце зазора, а южный — на правом (рис. 11.5.3, б). Когда ток меняет направление, полюсы тоже меняются местами (рис. 11.5.3, в). Во время записи звук представлен колебаниями тока в обмотке и, следовательно, колебаниями магнитного поля в зазоре кольца.

Перед контактом с записывающей головкой покрытие на пленке должно быть размагничено. Этим занимается стирающая головка, подвергающая ленту воздействию быстро меняющегося магнитного поля, которое ориентирует магнитные частицы случайным образом. Стирающая головка — это, в сущности, та же записывающая головка с дополнительным широким зазором, через обмотку которой течет сильный высокочастотный переменный ток. По мере того как магнитное покрытие проходит через быстро меняющееся направление магнитное поле в зазоре, магнитная ориентация частиц много раз меняется. Несмотря на то, что каждая отдельная частица покрытия всегда магнитна, в результате процесса стирания примерно половина частиц будет ориентирована в одном направлении, а вторая половина — в другом (рис. 11.5.5, а).

Если задача стирающей головки — размагнитить ленту, то задача записывающей — намагнитить ее: переориентировать все микроскопические магнетики таким образом, чтобы их одноименные полюсы были направлены в одну и ту же сторону (рис. 11.5.5, б). Как мы уже знаем, частицы на самом деле не поворачиваются, а только меняют местами свои полюсы. По мере того как магнитная лента равномерно проходит вдоль записывающей головки, зазор в записывающей головке намагничивает участки магнитного покрытия ленты в том или ином направлении (рис. 11.5.6). Глубина намагничивания зависит от силы магнитного поля в зазоре, которое, в свою очередь, пропорционально току в обмотке. Поскольку ток несет информацию о звуке и давлении воздуха, большая глубина намагниченности соответствует высокой громкости, маленькая — низкой. Направление намагниченности (вперед или назад обращены северные полюсы) определяется направлением тока через катушку, которое меняется в зависимости от того, отражает ли оно сжатие или разрежение воздуха.

При записи звука возникает серьезное осложнение: когда звук тихий, записывающая головка не справляется с переменной полюсов у магнитных частиц. Частицы находятся в состоянии устойчивого магнитного равновесия и не реагируют на слишком слабое магнитное поле. Когда следуют громкие фрагменты звуковой



а)

Магнитное покрытие после стирания

б)

Намагниченное магнитное покрытие

**Рис. 11.5.5.** После стирания в магнитном покрытии примерно у половины частиц северный полюс находится слева, у половины — справа (а). В намагниченной части покрытия (б) у всех частиц северный полюс смотрит в одну и ту же сторону.

информации, намагничивание ленты идет без труда, но когда наступает очередь тихих, магнитные частицы могут вообще не намагнититься. Чтобы решить эту проблему, магнитофон посылает дополнительный высокочастотный переменный ток через обмотку записывающей головки. Этот ток смещения, или ток подмагничивания, во время записи меняет магнитную ориентацию частиц.

Подмагничивание не влияет на общую намагниченность ленты, но позволяет другим токам, представляющим звук, намагничивать покрытие, даже когда микрофон имеет дело с тихим фрагментом. Магнитофоны регулируют уровень подмагничивания в соответствии с типом ленты, которая определяется магнитной твердостью частиц в покрытии.

## Воспроизведение, уменьшение уровня шума, стерео

Магнитофон воспроизводит звук, пропуская магнитную ленту вдоль головки воспроизведения. Головка воспроизведения очень похожа на записывающую головку — часто бывает так, что обе роли играет одна и та же головка. В магнитофонах высокого качества отдельная головка воспроизведения расположена следом за записывающей головкой, так что вы можете воспроизводить аудиоинформацию непосредственно во время записи. Поскольку задачи у записывающей и воспроизводящей головок разные, отдельные специализированные головки по результатам превосходят универсальную, которая должна справляться с обеими задачами.

Когда намагниченная лента проходит вдоль зазора воспроизводящей головки, она временно намагничивает кольцо (рис. 11.5.7). Чем глубже намагниченный слой в покрытии, тем сильнее намагничивается кольцо и тем больше линий магнитной индукции проходит через обмотку кольца. Лента движется вдоль головки, и изменение магнитного потока индуцирует в обмотке ток. Индуцированный ток напрямую связан с исходным током, который прошел через обмотку записывающей головки во время записи. Этот ток усиливается и направляется в динамик, где он воспроизводит ту же картину сжатий и разрежений воздуха, которая имела место в исходном звуке.

К сожалению, магнитофон не в состоянии идеально воспроизвести звук. Из-за несовершенства записи и воспроизведения на звук накладывается некоторый шум. Основные причины возникновения шума:

- 1 некачественное стирание;
- 2 неравномерность распределения магнитных частиц в покрытии;
- 3 недостатки подмагничивания при записи звуков низкой громкости;
- 4 недостаточно ровная поверхность покрытия.

Шум также появляется, если пленка слишком туго намотана на бобину: сильно намагниченные участки ленты накладывают намагниченность на участки на соседних витках. Шумы в основном проявляются как высокочастотные шипящие и свистящие звуки и особенно мешают при прослушивании тихих фрагментов.

Чтобы улучшить качество звучания, во многих магнитофонах используются схемы шумоподавления, например система шумоподавления Dolby. Эти методы предусматривают повышение громкости высокочастотных звуков во время записи и уменьшение их громкости во время воспроизведения. В итоге записываемый звук остается неизменным, но уменьшается любой высокочастотный шум, который появился между записью и воспроизведением.

Многие магнитофоны могут одновременно работать более чем с одним звуковым каналом. Стереомангнитофоны записывают и воспроизводят одновременно две и более звуковых дорожки, чтобы зафиксировать звуки, которые улавливают расположенные в разных местах микрофоны. В этих устройствах имеется по крайней мере две расположенных рядом головки записи и такое же количество головок воспроизведения. Каждая головка записывает (или воспроизводит) отдельную узкую намагниченную дорожку.

## Магнитофоны и видеомангнитофоны

Механизмы, отвечающие за движение магнитной ленты, развивались в течение последних пятидесяти лет, и большинство магнитных лент теперь заключены

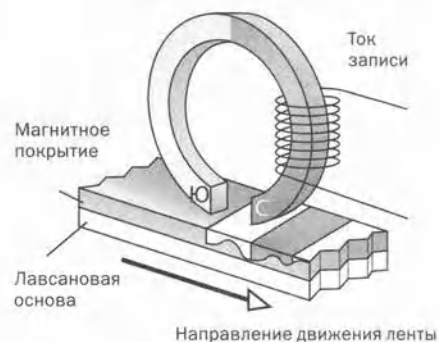


Рис. 11.5.6. Записывающая головка намагничивает участки проходящей вдоль нее магнитной ленты. Глубина намагничивания пропорциональна силе тока в обмотке.

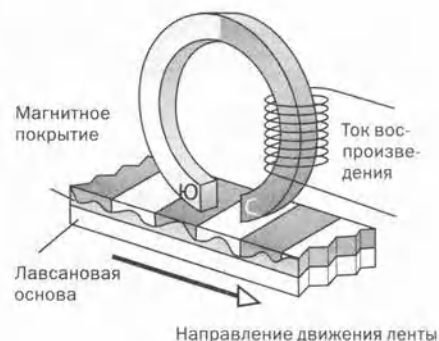


Рис. 11.5.7. Намагниченная лента, проходя вдоль зазора в кольце головки воспроизведения, намагничивает кольцо. Магнитный поток, проходящий через обмотку, постоянно меняется. В обмотке возникает индуцированный ток, который соответствует записанному звуку.

в пластиковые кассеты. Длинные, непрерывные и тонкие полосы ленты перематываются с одной катушки на другую при помощи лентопротяжного механизма, который проводит их вдоль головок стирания, записи и воспроизведения.

Главный компонент этой системы — ведущий вал. Он представляет собой равномерно вращающийся цилиндрический стержень, который контролирует скорость протягивания ленты. Ролик прижимает ленту к валу, и она равномерно движется вперед по мере вращения вала. Чтобы увеличить момент инерции и таким образом обеспечить постоянную скорость вращения, к валу крепится маховик. Строгая равномерность движения ленты необходима для более точного воспроизведения записанного звука. Изредка, когда из-за отсутствия сцепления с валом лента вдруг начинает двигаться слишком быстро, голос Луи Армстронга может внезапно зазвучать как визг героев фильма “Элвин и бурундуки”.

Видеомагнитофон — гораздо более сложное по сравнению с магнитофоном устройство, потому что для сохранения изображения вместе со звуком требуется очень много места на магнитной ленте. Поскольку наименьший участок намагниченности, который может создать записывающая головка, занимает в длину около 1 мкм, каждую секунду видеомагнитофон использует дорожку длиной около 2 м. Вместо того чтобы быстро протягивать длинную ленту вдоль неподвижных головок, видеомагнитофон быстро водит головками поперек широкой ленты. Головки закреплены на вращающемся барабане, лента прижимается к барабану под углом. По мере того как лента медленно движется вдоль барабана, вращающийся барабан наносит или считывает серию полосок поперек ленты. Поскольку полосы ложатся на ленту под углом, в сохранении информации задействована вся поверхность ленты.

## Магнитная запись и хранение информации

---

Магнитная запись цифровой информации в большой степени основана на тех же принципах. Цифровая информация представляет собой поток двоичных разрядов, нулей и единиц, поэтому их магнитная запись сводится главным образом к намагничиванию однодоменных частиц в ту или иную сторону. Различия между магнитной аудио- и видеозаписью и записью и сохранением цифровой информации в основном носят технический характер.

Преобладающий формат магнитного сохранения данных — накопитель на жестком диске. Его сердце — твердый диск с магнитным покрытием, который быстро вращается под головками магнитной записи и воспроизведения (рис. 11.5.8). Так как эти головки при вращении диска могут перемещаться либо к его центру, либо к краю, они могут взаимодействовать с любым участком поверхности диска. Накопитель сохраняет информацию, намагничивая мельчайшие участки поверхности диска, и извлекает эту информацию, измеряя намагниченность тех же участков. Поскольку у накопителя нет стирающей головки, которая готовила бы покрытие диска к записи, его записывающая головка должна быть в состоянии намагнитить все покрытие насквозь, чтобы любой участок его поверхности представлял либо 0, либо 1. По этой же причине толщина магнитного покрытия жестких дисков не может быть больше 1 микрона.

Однако разместить двоичные разряды (биты) на поверхности диска не так-то легко, и накопитель нуждается в указаниях, где заканчивается один бит и начинается другой. Таким указанием служит резкое изменение направления намагниченности — в этот момент диск “понимает”, что начинается новый бит. Но если имеется слишком много битов, намагниченных в одном направлении, жесткому диску сложно отличить каждый бит от следующего. Чтобы бит впоследствии легче было найти, диск особым образом манипулирует цифровой информацией, которую записывает, периодически добавляя дополнительные изменения направления намагниченности. Когда впоследствии компьютер считывает биты с поверхности диска, он распознает и игнорирует эти дополнительные изменения.

Когда диск вращается под записывающей головкой, головка намагничивает только тонкую круговую дорожку на его поверхности. Перемещая головку то к центру, то к краю диска, накопитель может получить доступ к тысячам отдельных дорожек. Чтобы быстро переносить головку с одного места в другое, накопитель использует систему с электромагнитным приводом. Благодаря небольшой массе





**Рис. 11.5.8.** В этом накопителе четыре диска и восемь записывающих магнитных поверхностей. У каждой поверхности отдельное магнитное покрытие и отдельные головки для чтения и записи. Головки могут за доли секунды перемещаться от центра диска к краю и наоборот.

головки и сильному взаимодействию между электромагнитом и стационарным постоянным магнитом, головка может перемещаться очень быстро. Чтобы перейти с одной дорожки на другую, ей достаточно нескольких тысячных долей секунды.

Максимальное количество битов, которые компьютер может сохранить на каждом квадратном сантиметре поверхности диска или ленты, зависит от трех факторов:

- 1 размера головок записи и воспроизведения;
- 2 способности диска распознавать биты на поверхности;
- 3 размера магнитных частиц записывающей поверхности.

С каждым годом записывающие и воспроизводящие головки становятся все меньше, благодаря чему они могут разместить бит на меньшем участке поверхности. Сложнее становится обнаружение этих крошечных битов, поэтому появилась новая технология изготовления головок воспроизведения, которая использует материалы, которые под действием магнитных полей меняют свое электрическое сопротивление. Магниторезистивная головка позволила значительно уменьшить размер бита и тем самым повысить плотность записи данных. Но поскольку чем меньше бит, тем труднее его обнаружить, это привело к дальнейшему усложнению системы управления головками записи и воспроизведения. Сейчас для обнаружения и отслеживания узенькой магнитной дорожки на диске используются электронные и оптические системы обратной связи.

Размер записывающих частиц тоже представляет собой сегодня серьезную проблему. Их нельзя уменьшать дальше без того, чтобы они не стали подвержены вносящему беспорядок влиянию тепловой энергии. Несмотря на то что игольчатые однодоменные частицы находятся в состоянии устойчивого магнитного равновесия, возвращающие силы пропорциональны их объемам, поэтому при уменьшении размеров они становятся менее стабильными. Случайное тепловое воздействие может перевернуть направление намагниченности маленькой магнитной частицы, и чем меньше частица, тем больше вероятность того, что это произойдет.

Поскольку накопители на жестких дисках должны надежно сохранять информацию как минимум десять лет, в них нельзя использовать частицы, которые подвержены спонтанному размагничиванию. В настоящее время для записи каждого бита информации требуется намагнитить несколько десятков микроскопических частиц. Это создает некоторый резерв, предохраняющий от теплового размагничивания. Кроме того, выстраивание магнитных частиц перпендикулярно поверхности диска, а не вдоль него, дает возможность более компактно разместить частицы и сэкономить место. Но предел максимально возможной плотности упаковки информации на магнитной поверхности уже близок.



## ГЛАВА 12

# ЭЛЕКТРОНИКА

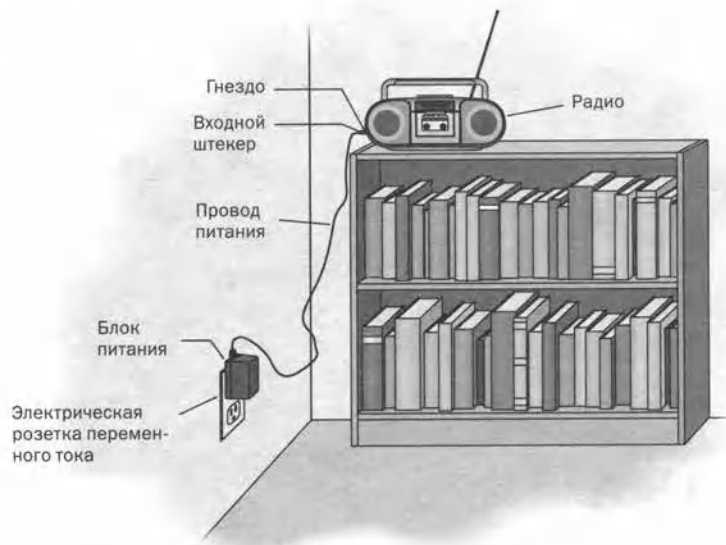
---

**К**ак мы уже знаем, электрические токи и намагниченные металлы умеют не только зажигать лампочки и удерживать записки на холодильнике. Они способны и на многое другое — например, хранить и воспроизводить звук, видеоизображения и компьютерную информацию. Более того, их можно использовать для того, чтобы управлять этой информацией, причем самыми удивительными способами и с потрясающей скоростью. Из этой главы мы узнаем, как электричество и магнетизм положили начало развитию электроники.

Электронные устройства — это инструменты, которые используют электрический ток для решения разнообразных сложных задач. Они родились в начале XX века, с появлением вакуумных ламп, и с тех пор росли, крестили и развивались. Очень часто достижения в электронике следовали за прорывами в квантовой физике и физике твердого тела, поэтому можно было ожидать, что успехи в физике полупроводников приведут к новому интересному повороту в развитии электроники. Однако на самом деле изобретение полупроводникового транзистора вскоре после Второй мировой войны произвело настоящую революцию, масштаб которой не мог предвидеть никто. Благодаря совместным усилиям физиков и инженеров, электронные устройства постепенно стали настолько доступными и эффективными, что стали достоянием всех слоев современного общества и проникли во все сферы современной жизни.

Хотя наш краткий обзор может охватить только самые основные вопросы электроники, он вполне способен обеспечить прочный фундамент для дальнейшего ее изучения. Если понять, как работают несколько самых важных электронных компонентов, то потом не так уж сложно сообразить, как бы объединить их таким образом, который до этого никому и в голову не приходил. Из электронных компонентов, которые управляют движением заряженных частиц, словно из кирпичиков, можно сложить практически все что угодно.

- 420 **12.1 Блоки питания**  
*Как адаптеры готовят электроэнергию для использования в электронных устройствах.*
  
- 434 **12.2 Аудиоплееры**  
*Как аудиоплеер сочетает черты компьютера и стереосистемы.*



## 12.1 Блоки питания

Практически каждый новый купленный вами электронный гаджет продается вместе с собственным блоком питания — маленьким черным кубиком или кирпичиком, который втыкается в электрическую розетку либо непосредственно, либо с помощью шнура. Блоки питания (адаптеры) получают энергию от электрической сети, разработанной более ста лет назад, и подготавливают ее для электронных устройств наших дней. Блоки питания очень разнообразны: они различаются не только рабочим напряжением и силой тока, но и тем, в какой степени они сглаживают и регулируют напряжение, а также разъемами, через которые подают энергию. Эти разъемы далеко не всегда взаимозаменяемы, и в результате в ящике вашего стола валяется чуть ли не десяток бесполезных в данный момент адаптеров, в то время как тот, что вам нужен, в соответствии с законом Мерфи, прячется где-то под диваном.

Тем не менее, несмотря на эти различия, у всех блоков питания, в сущности, одна и та же главная задача: они получают переменный ток относительно высокого напряжения и преобразуют его в постоянный ток относительно низкого напряжения. Свою задачу они выполняют эффективно, недорого и с высокой степенью надежности. В этом разделе мы увидим, как это происходит.

### Получение энергии постоянного тока из энергии переменного тока

Обычные электрические бытовые приборы, такие как тостеры или лампы накаливания, могут работать и от переменного, и от постоянного тока, однако для большинства электронных устройств подходит только постоянный ток. У этой разборчивости есть две причины. Во-первых, наши гаджеты содержат сложные электронные компоненты, чувствительные к направлению тока, и эти компоненты не будут работать, если направление меняется. Во-вторых, электронным устройствам, как правило, нужен непрерывный приток энергии, поэтому они не выдерживают даже таких коротких перерывов в электропитании, которые возникают, когда переменный ток меняет направление.

Понятно, что электронные устройства, которым необходим постоянный ток, должны прекрасно работать от батарей. Разумеется, эти батареи должны быть правильно установлены — иначе они будут подавать ток не в ту сторону, — но, в принципе, можно сказать, что батареи и гаджеты просто созданы друг для друга!

К сожалению, запас энергии в батареях рано или поздно истощается, и их нужно заряжать или менять. К тому же некоторые электронные устройства так жадно потребляют энергию, что “кормить” их только от батарей весьма разорительно. Если вы не наследница или племянник владельца фабрики батареек, то

вам требуется более дешевый и более практичный источник питания постоянного тока. Вам нужен адаптер.

Как мы уже говорили, задача у блока питания простая: он использует переменный ток от электросети, чтобы обеспечить постоянный ток для электронного устройства. Говоря точнее, он подает ток электронному устройству по положительному проводу и получает этот ток обратно по отрицательному. Кроме того, адаптер поддерживает заданное напряжение между отрицательным и положительным проводами, то есть работает как батарея. Насколько хорошо способен адаптер поддерживать стабильность напряжения, зависит от его сложности. Некоторые адаптеры допускают колебания напряжения вместе с переменным током, в то время как другие тщательно его регулируют при помощи сложной электроники. Промежуточный вариант между двумя этими крайностями — адаптер, который использует более простую электронику, чтобы сгладить большую часть колебаний, связанных с периодами переменного тока, но не пытается регулировать напряжение. Именно эти “промежуточные” блоки питания мы и рассмотрим в данном разделе.

Если совсем конкретно, давайте займемся блоком питания с напряжением 9 В постоянного тока (рис. 12.1.1), работающим от сети переменного тока 120 В. Пусть наш адаптер подает электроэнергию обычному радиоприемнику. Не считая проводов, в этом блоке всего несколько компонентов: трансформатор, четыре диода и конденсатор. Чтобы понять, как работает блок, нам нужно изучить эти компоненты и их взаимодействие. Некоторое преимущество у нас уже есть: трансформаторы мы успели рассмотреть в разделе 11.2.

При подключении трансформатора к электрической розетке его первичная обмотка образует контур с внешним источником питания, и через нее начинает течь переменный ток. Первичная обмотка имеет в  $1\frac{3}{4}$  раз больше витков, чем вторичная, таким образом, вторичная обмотка обеспечивает индуцированную ЭДС 9 В переменного тока.

Затем адаптер преобразует переменное напряжение с амплитудой 9 В в постоянное, которое и подается на радиоприемник. Этим преобразованием, которое на слух кажется таким простым делом, мы и будем заниматься до конца этого раздела. В значительной степени трудности у нас возникнут из-за того, что в этом процессе принимают участие два типа устройств, с которыми мы еще не сталкивались: диоды и конденсаторы.

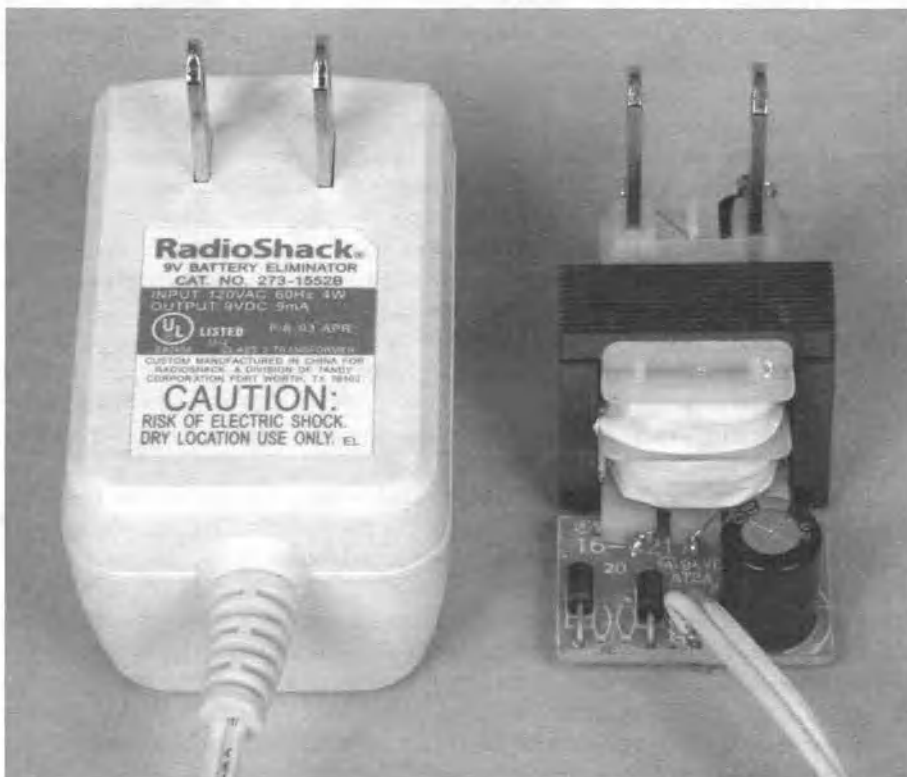
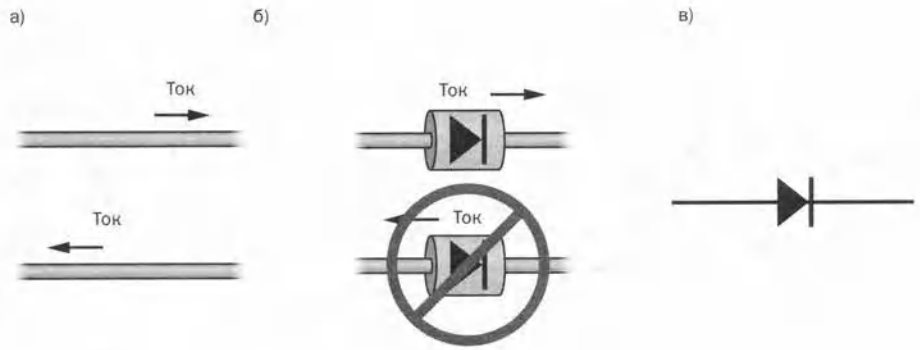


Рис. 12.1.1. Эти блоки питания преобразуют переменный ток от электрической розетки напряжением 120 В в постоянный ток напряжением 9 В для радиоприемника. Корпус правого блока снят, чтобы можно было увидеть трансформатор (сверху), два черных диода (внизу слева) и цилиндрический конденсатор (внизу справа).

Рис. 12.1.2. (а) Ток может течь по проволоке в любом направлении; (б) диод может проводить ток только в направлении, указанном стрелкой; (в) в электрических схемах диод обозначают треугольной стрелкой и вертикальной чертой.



Диод — это односторонний проводник электрического тока. В отличие от проволоки, которая одинаково хорошо проводит ток в любом направлении (рис. 12.1.2, а), диод позволяет току проходить только в одном направлении (рис. 12.1.2, б). Он работает как проводник, когда ток пытается идти в разрешенном направлении, и как изолятор, когда ток пытается идти в запрещенном направлении. Именно эту особенность блок питания использует для получения постоянного тока из переменного.

Конденсатор — это устройство, которое накапливает и хранит отдельные электрические заряды. Собирая на одном конце положительные заряды, а на другом — отрицательные, конденсатор сохраняет и заряд, и энергию. Этот запас помогает блоку питания обеспечить стабильность напряжения и пережить те моменты, когда изменение направления переменного тока прерывает питание адаптера.

## Пара слов о квантовой физике

Поскольку диод чувствителен к направлению тока, он не может быть симметричным — его концы должны отличаться один от другого. Чтобы понять, чем они различаются, нам нужно познакомиться с материалами, из которых делают диоды. А именно — с полупроводниками.

Полупроводники — это материалы, обладающие промежуточными свойствами между проводниками и диэлектриками. В то время как в проводниках заряд всегда подвижен, а в диэлектриках — почти никогда не подвижен, в полупроводниках заряд иногда подвижен. Обобщая, можно сказать, что полупроводник ведет себя как диэлектрик, когда он холодный, чистый и находится в темноте, и как проводник — когда он горячий, загрязненный или находится на свету. Полупроводники играют такую огромную роль в диодах и вообще в современной электронике, что несколько следующих страниц мы посвятим движению заряда через полупроводники. Начнем с азов квантовой физики, изучающей мельчайшие частицы, из которых состоят полупроводники.

В начале XX века, постепенно проникая в глубь квантовой физики, ученые испытали одновременно и восторг, и недоумение. До того времени материальный мир, казалось, аккуратно делился на частицы и волны: физики рассматривали электрон исключительно как частицу, а свет — только как волну. Однако один из основополагающих принципов квантовой физики, имеющий непосредственное отношение к нашей теме, гласит, что любой объект имеет как корпускулярные (присущие частице), так и волновые свойства. Проще говоря, все начинается и заканчивается как частица, но движется как волна.

Когда речь об электроны, удивительно то, что он движется как волна. Когда о свете — то, что он испускается и поглощается как частица. Этот принцип корпускулярно-волнового дуализма — что все в природе имеет свойства как частицы, так и волны — не затронул лишь некоторые области физики. Но хотя квантовая физика в настоящее время является основной и неотъемлемой частью практически всех современных физических исследований, ее проявления очень незаметны и часто неочевидны. Они обнаруживаются только в микроскопическом мире и не видны нам напрямую. Неудивительно, что они кажутся нам такими странными.

В последующих главах мы еще не раз встретимся с квантовой физикой и ее приложениями. Она объясняет электронные свойства полупроводников, свет, из-

лучаемый атомами и лазерами, радиоактивный распад, при котором испускается ядерная энергия. Пока что, обсуждая полупроводники, мы познакомимся с волновой природой электронов и покажем, какое отношение к квантовой физике имеют волновые явления, которые мы изучали в главе 9. Изучая свет от лазеров и атомов, мы рассмотрим корпускулярную природу света и узнаем, как столкновения, эффекты соударения, которые мы изучили в главах 1–3, применимы к квантовой физике. А занимаясь радиоактивностью, мы столкнемся с такими свойствами частиц и волн, о которых мы бы даже не подозревали, если бы не квантовая физика. И каждый раз, наблюдая, как квантовые эффекты проявляются в нашей повседневной жизни, мы по чуть-чуть вкусим от плодов квантовой физики.

## Электроны в твердых веществах

Из главы 10 мы уже узнали, что металлы проводят электричество благодаря тому, что в них содержатся подвижные электроны, а диэлектрики не проводят электричество, потому что их электроны не обладают подвижностью. Теперь пора узнать, от чего же зависит подвижность электронов. Как вы уже догадываетесь, объяснение дает квантовая физика.

Внеквантовом мире электрон в твердом теле передвигается только как частица и может двигаться на любой скорости в любом направлении. Но наш мир — квантовый, и электрон перемещается не как частица, а как волна. И так же, как и у волны, распространяющейся в скрипичной струне, в барабане или в емкости с водой, у электронной волны в твердом теле довольно ограниченные возможности.

В главе 9 мы говорили о том, что основная форма механических волн для протяженных систем с ограниченными размерами — стоячая волна. Она эффективно колеблется, оставаясь на месте. Это правило действует и в отношении квантовых волн. Поведение электронов в твердом теле проще всего понять, если рассматривать их как стоячую волну. Каждая электронная волна распространяется через твердое тело или через его часть и имеет такие характеристики, как длина волны и частота. В отличие от вибрирующей струны или поверхности барабана, электронная волна представляет собой трехмерную волну с внутренними колебаниями. Но тем не менее это волна.

Свойства этой волны очень сильно влияют на электронную структуру твердых тел. Важнее всего то, что она ограничивает возможности электронов в твердом теле. Как мы видели в главе 9, одномерная стоячая волна скрипичной струны состоит только из своей основной моды (рис. 9.2.3) и гармонических мод (рис. 9.2.4), а двумерная стоячая волна мембраны барабана состоит только из основной моды и обертонов (рис. 9.2.7). Аналогичным образом трехмерная электронная волна в твердом веществе состоит только из основной моды и обертонов. И хотя существует множество обертоновых колебательных мод, их возможности ограничены.

Электронные стоячие волны в твердых веществах часто называют уровнями\* — констатация того, что каждой стоячей волне соответствует определенное количество, или уровень, энергии. В атомах — еще одной группе ограниченных систем, в которых электроны существуют в виде стоячих волн, — электронные стоячие волны называются орбиталями: намек на орбитальный характер движения электрона в атоме. Когда мы будем рассматривать газоразрядные лампы (раздел 14.2), то узнаем, что ограниченный выбор орбиталей для каждого атома определяет цветовую гамму света, который он может испускать или поглощать. А в настоящем разделе мы увидим, что в твердом теле ограниченный выбор уровней определяет его электропроводность.

Еще один замечательный вывод квантовой физики состоит в том, что каждый неразличимый (или тождественный, то есть неотличимый от других) электрон должен иметь свой уровень или орбиталь\* \*, то есть свою собственную уникальную квантовую волну. Этот закон называется принципом Паули в честь его первооткрывателя, Вольфганга Паули (см. ❶).

Принцип распространяется также на целый класс субатомных частиц, или фермиевских частиц, в число которых входят все основные составляющие материи: электроны, протоны и нейтроны. По причинам, которые объясняет очень сложный раздел физики, известный как квантовая теория поля, две неразличимые фермиевские частицы никогда не могут существовать в одной и той же квантовой волне.

❶ Австрийский физик Вольфганг Паули (1900–1958) прославился уже в возрасте двадцати одного года, написав статью о теории относительности, которая произвела впечатление на самого Эйнштейна. Следующим достижением Паули было открытие принципа запрета — основы квантовой теории. Паули был известен тем, что весьма критически относился к новым идеям, называя их чепухой, пока его не убеждали в обратном. Паули также очень интересовался психологией, переписывался с Карлом Густавом Юнгом и даже писал в этой области статьи.

\* Точнее говоря, энергетическими уровнями называют возможные значения энергии, соответствующие стоячим волнам.

\* \* Уточним, что каждый электрон должен иметь свою собственную уникальную квантовую волну, но некоторые из волн при этом могут иметь одинаковые или очень близкие уровни энергии.

## Принцип запрета Паули

Две неразличимые фермиевские частицы никогда не могут находиться в одинаковом квантовом состоянии, то есть занимать одну квантовую волну.

Тем не менее некое своеобразное свойство электронов позволяет двум из них занимать одну и ту же орбиталь или уровень. Электроны имеют два возможных внутренних состояния, которые обычно называют “спин-вверх” и “спин-вниз”. Поскольку “спин-вверх” электрон отличается от “спин-вниз” электрона, то один “спин-вниз” и один “спин-вверх” электроны могут занимать один и тот же уровень. Однако два электрона — это уже абсолютный максимум, который допускается квантовой физикой и принципом Паули.

Электрон является волной, но, несмотря на это, находящийся на некотором уровне электрон обладает определенной полной энергией — суммой его кинетической и потенциальной энергий. Эта энергия, зависящая от формы и структуры электронной волны, одновременно определяет частоту колебаний волны. Согласно квантовой физике, полная энергия электрона и частота колебаний его волны прямо пропорциональны друг другу; электроны низкой энергии колеблются медленно, высокоэнергетические электроны — быстро. Мы вернемся к этому в главе 14, а пока отметим, что каждый уровень, каждая стоячая квантовая волна в твердом теле имеет определенную частоту и энергию. Основная мода стоячей волны в твердом теле характеризуется самой низкой частотой и энергией, в то время как обертоновые волны имеют более высокие значения частоты и энергии.

Физики пришли к тому, что рассматривают эти стоячие волны как некие абстрактные коридоры, существующие независимо от электронов, которые могут появляться или не появляться на них в данный момент. Можно сказать, что уровни аналогичны креслам в театральном зале, каждое из которых в данный момент может быть занято или не занято. Вместо того чтобы говорить, что электрон испытывает воздействие стоячей волны или уровня, мы говорим, что уровень занят электроном. При таком подходе уровень начинает играть еще более важную роль. В оставшейся части этого раздела мы будем рассматривать твердые вещества, оперируя понятием уровня: какие уровни доступны и заняты ли они электронами.

Твердое вещество содержит невероятно большое число электронов и множество уровней, на которых могут разместиться эти электроны. Какие же уровни занимают электроны?

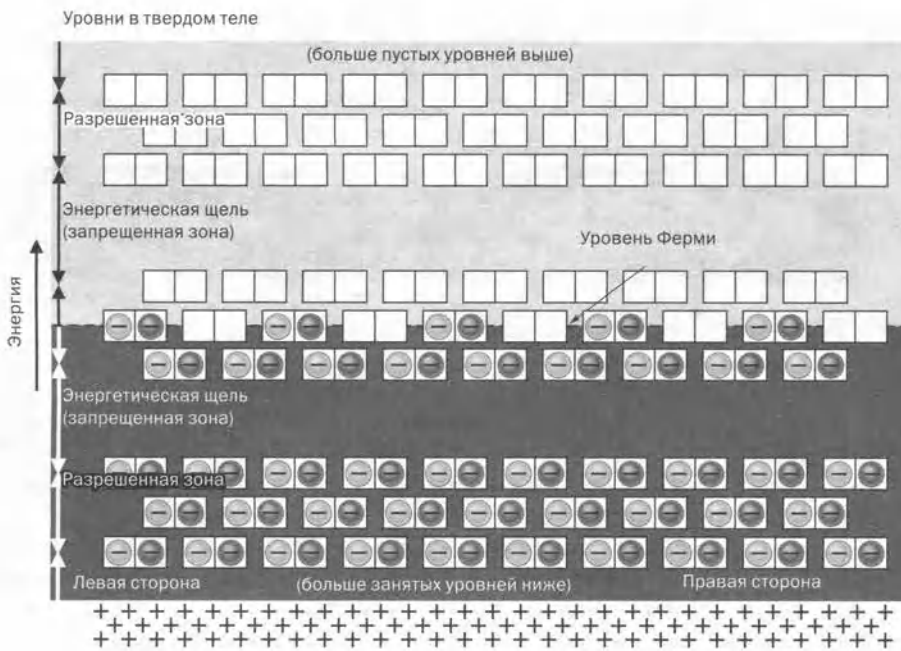
При достаточно низкой температуре электроны занимают те уровни, у которых меньше энергии. Вследствие особенностей термодинамики, два первых электрона занимают самый нижний доступный энергетический уровень. Затем последующие электроны заполняют все более высокие энергетические уровни вплоть до определенного максимума энергии, когда размещены уже все электроны. Посередине между самым высоким заполненным уровнем и самым низким незаполненным находится уровень Ферми — гипотетическая орбиталь, которая обозначает верхнюю границу этого моря электронов Ферми. Энергия, которой обладал бы электрон, находясь на этом гипотетическом уровне, называется энергией Ферми.

Аналогия с театром поможет нам понять процесс заполнения уровней. Он напоминает то, что происходит на успешном спектакле или концерте: люди занимают места снизу вверх, начиная с первого ряда партера, — все хотят сидеть как можно ниже и ближе к сцене. К началу спектакля зрители заполняют все места вплоть до определенного ряда. Посередине между последним занятым и следующим за ним первым незанятым местом находится гипотетическое место Ферми.

Если мы графически обозначим уровни двойными квадратиками и расположим их вертикально по запасу энергии (рис. 12.1.3), то уровни (квадратики) ниже уровня Ферми содержат каждый два электрона, а уровни выше уровня Ферми пусты. Хотя тепловая энергия несколько усложняет эту картину, смещая электроны относительно уровня Ферми, при комнатной и более низких температурах это можно не принимать во внимание.

Поскольку уровни — это стоячие волны, они не имеют строго определенного положения в пространстве. Но можно смело предположить, что каждый уровень в твердом теле помещает свои электроны вблизи определенного места, как показано на рис. 12.1.3. Несмотря на упрощение, этот рисунок дает достаточно точное представление о физике движения заряда в веществе.





**Рис. 12.1.3.** Уровни в твердом теле группируются в зоны и заполняются снизу вверх, с самого низкого энергетического уровня до уровня Ферми. Каждый уровень может содержать максимум два электрона: один “спин-вверх” (светлый кружок) и один “спин-вниз” (темный кружок). Показанные внизу положительные заряды — ядра атомов, которые компенсируют электроны и делают вещество электрически нейтральным.

Разумеется, электроны не единственные заряженные частицы в твердом теле. В атомах есть также положительно заряженные ядра. Но ядра в общем и целом неподвижны и редко участвуют в переносе электричества. Вместо этого они образуют однородную основу из положительных зарядов, схематически обозначенную плюсами (+) в нижней части **рис. 12.1.3**, так что соблюдается электрическая нейтральность вещества.

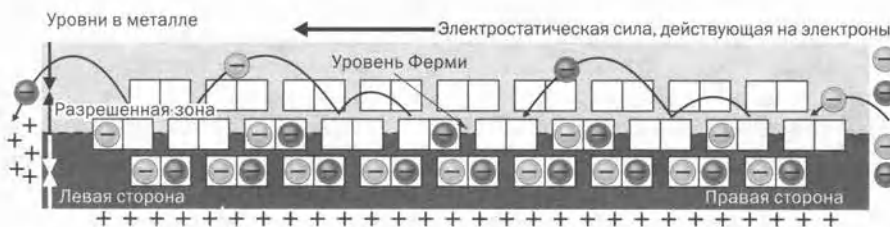
## Металлы, диэлектрики и полупроводники

Уровни в твердом теле объединены в группы, называемые зонами. Каждая зона соответствует группе стоячих волн с определенным типом структуры. Поскольку уровни в зоне состоят из волн одного типа, их энергии также близки. Между различными зонами может быть энергетическая щель или запрещенная зона — диапазон энергий, в котором не существует никаких уровней. В твердом теле нет и не может быть электронов с энергиями, которые лежат в запрещенной зоне.

Металлы, диэлектрики и полупроводники отличаются друг от друга распределением разрешенных и запрещенных зон. Когда уровень Ферми расположен в запрещенной зоне, он может помешать электронам в твердом теле отреагировать на внешние силы. Чтобы увидеть, как это происходит, давайте рассмотрим сначала металлы, а затем диэлектрики.

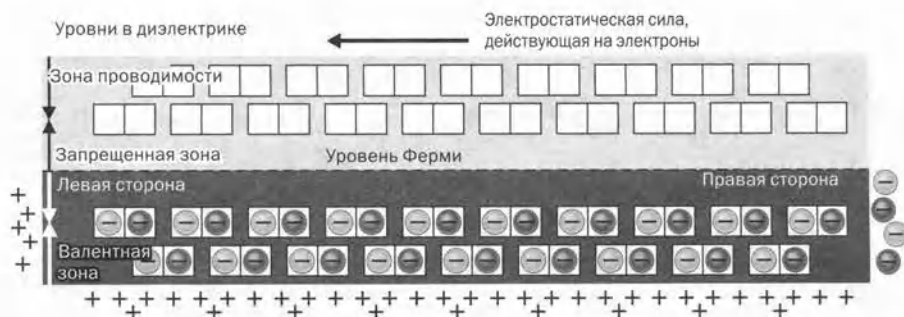
В металле уровень Ферми лежит внутри зоны (**рис. 12.1.4**). Так как пустые уровни этой же зоны расположены чуть выше ее заполненных уровней, нужно совсем немного энергии, чтобы переместить электроны с заполненного уровня на пустой. Благодаря этому свойству металлы могут проводить электричество.

Если к металлу подвести положительный заряд слева, а отрицательный заряд (электроны) — справа, на электроны будет действовать направленная влево электростатическая сила, и они начнут двигаться влево. Они будут двигаться, перескакивая с заполненных уровней на незаполненные, получая нужную для этого



**Рис. 12.1.4.** В металле уровень Ферми находится внутри разрешенной зоны. Если подвести отрицательный заряд (электроны) справа, а положительный заряд — слева, электроны начнут перемещаться по металлу справа налево, используя незанятые уровни. Поскольку имеет место поток зарядов через металл, следовательно, последний проводит электричество.

**Рис. 12.1.5.** В диэлектрике уровень Ферми находится посередине запрещенной зоны. Если подвести к диэлектрику заряды, электроны, находящиеся на заполненных уровнях, не смогут перемещаться и создавать поток зарядов через диэлектрик. Поэтому диэлектрик не проводит электричество.



энергию за счет работы, которую совершают над ними электростатические силы. В конце концов электроны, попадающие в металл справа, будут выходить слева — таким образом металл проводит электричество!

В нашей “театральной” аналогии металл — это зрительный зал, где в партере занято только около половины мест. Если вы попросите зрителей сдвинуться влево, тем, которые сидят в последнем из занятых рядов, будет легче всего это сделать. Каждый без труда найдет рядом с собой свободное место и переседает. Тогда новая группа зрителей сможет войти в зал справа, в то время как остальные будут покидать его слева. Такой “металлический” зал будет “пропускать” людей.

В отличие от металлов, в диэлектриках уровень Ферми находится в середине запрещенной зоны, между верхним уровнем одной разрешенной зоны и нижним уровнем другой (рис. 12.1.5). В отсутствие доступных пустых уровней, до которых можно было бы легко добраться, требуется очень большая энергия, чтобы переместить электроны с заполненных уровней на пустые. Если, как и в предыдущем примере, подвести к диэлектрику положительный заряд слева, а отрицательный — справа, на электроны также будет действовать направленная влево электростатическая сила, но они не смогут сдвинуться с места. Чтобы переместиться на один из пустых уровней верхней разрешенной зоны, электрону из нижней зоны нужно гораздо больше энергии, чем он может получить от электростатических сил. Поскольку через диэлектрик не идет поток зарядов, он не проводит электричество!

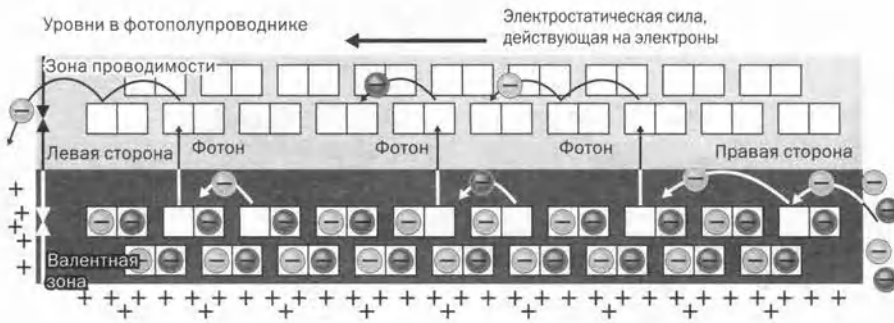
Если продолжать нашу аналогию с театром, то диэлектрик — это зал, в котором весь партер заполнен, но весь балкон пустой. Если вы попросите зрителей в партере сдвинуться влево, они просто не смогут этого сделать: все места в партере слева от них заняты. Но допрыгнуть до балкона, чтобы занять пустующие там кресла, они тоже не в состоянии. Такой “диэлектрический” театр не может “пропускать” людей.

Итак, в металле зона, в которой лежит уровень Ферми, заполнена только частично, и электроны могут легко переходить с заполненного уровня на незаполненный. В диэлектрике зона, расположенная под уровнем Ферми, — валентная зона — заполнена до предела, а зона, лежащая над уровнем Ферми, — зона проводимости — пуста, что делает перемещение зарядов крайне затруднительным.

Однако и в диэлектриках электрон может перескочить с валентного уровня (один из уровней в валентной зоне) на уровень проводимости (уровень в зоне проводимости), если каким-то образом получит необходимую энергию. Одним из возможных источников энергии является свет. Если диэлектрик подвергнуть воздействию определенного типа излучения, то электроны смогут переходить из валентной зоны в зону проводимости (рис. 12.1.6).

Как только в обычно свободных зонах проводимости появляются электроны, а в обычно заполненной валентной зоне образуются незаполненные уровни, электроны могут реагировать на электростатические силы. Они могут переходить с заполненных уровней на близлежащие незанятые уровни и таким образом перемещаться внутри вещества. Электроны могут войти в вещество с одной стороны и выйти с другой, то есть вещество проводит электричество. И поскольку это свет превратил диэлектрик в проводник, мы называем такое вещество фотопроводником.

Возвращаясь к нашей аналогии, в диэлектрическом театре можно в роли света представить гигантскую шаловливую гориллу, которая разгуживает по партеру и время от времени забрасывает кого-то из зрителей на балкон. Когда некоторые кресла в партере внезапно освобождаются (а несколько мест на балконе теперь заняты ошеломленными людьми), остальные зрители партера теперь могут отклик-



**Рис. 12.1.6.** Когда свет падает на диэлектрик, энергия фотонов переносит некоторые электроны с заполненных валентных уровней на свободные уровни проводимости. Такие перемещения позволяют электронам двигаться под действием электростатических сил, так что диэлектрик становится электрическим проводником (фотопроводником).

нуться на вашу просьбу сдвинуться влево. Горилла превращает театр-диэлектрик в проводник!

Но далеко не всякий свет способен превратить диэлектрик в фотопроводник. Дело в том, что свет испускается и поглощается энергетическими порциями или квантами, которые называются фотонами. Как и в случае электрона, энергия фотона пропорциональна его частоте; чем выше частота света, тем большей энергией обладает каждый фотон. Чтобы переместить электрон через запрещенную зону в обычном диэлектрике, нужен свет высокой частоты и энергии; диэлектрик должен быть подвергнут действию фиолетового или даже ультрафиолетового света.

Но природа позаботилась о том, чтобы снабдить нас веществами с небольшой запрещенной зоной, которую можно преодолеть с помощью красного или инфракрасного низкочастотного света с низкой энергией. Эти вещества называются полупроводниками, потому что по своим свойствам они занимают промежуточное положение между проводниками и диэлектриками. Для полупроводников характерны небольшие запрещенные зоны, через которые свет, тепло или другие источники энергии могут с относительной легкостью переносить электроны из валентной зоны в зону проводимости. В нашей аналогии полупроводниковый театр — это театр-диэлектрик с очень низкими балконами, так что даже детеныш гориллы может забросить туда человека.

За те полвека, что ученые и инженеры работают с полупроводниками, они придумали удивительное множество электронных устройств. Тщательно конструируя структуру и химический состав полупроводниковых материалов, таких как кремний, германий и арсенид галлия, они создали виртуозный набор инструментов для электронных волн в твердых телах — не менее поразительных и уникальных, чем инструменты для создания музыкальных волн в великих оркестрах. Из всех этих электронных инструментов самым простым является полупроводниковый диод.

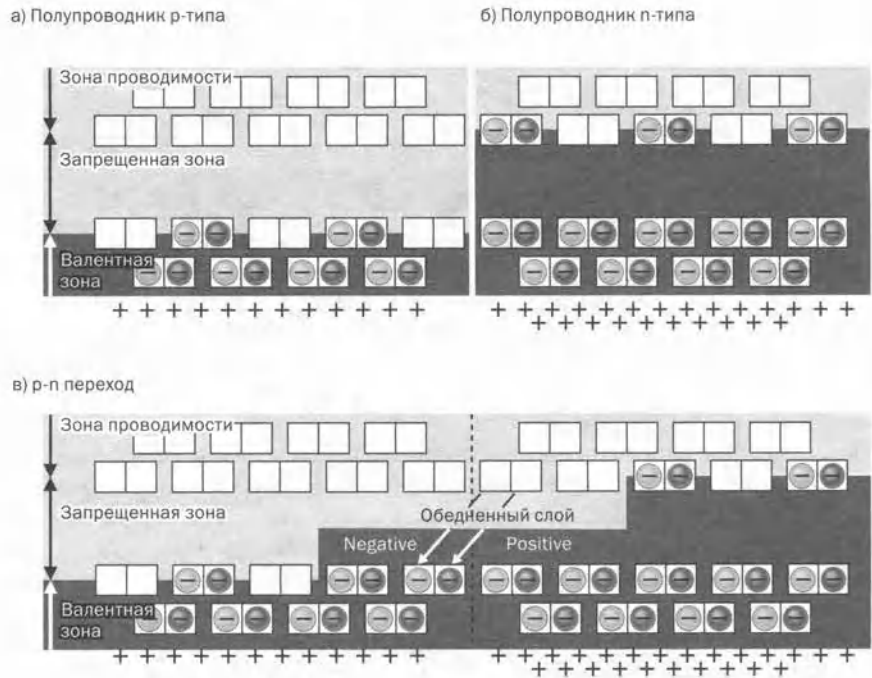
## Диоды

Диод — это устройство для прохождения тока с односторонней проводимостью; оно разрешает протекание тока только в каком-то одном направлении, но не в противоположном. Несмотря на то, что за многие годы были разработаны различные типы диодов, в блоках питания и почти во всех других современных электронных устройствах используются полупроводниковые диоды.

Полупроводниковый диод получают, соединив вместе два разных полупроводника. Оба эти полупроводника устроены таким образом, чтобы в них не было идеально заполненных валентных зон и идеально пустых зон проводимости. Вместо этого в них добавляют атомы так называемых легирующих примесей, чтобы создать либо несколько пустых валентных уровней (полупроводники р-типа, **рис. 12.1.7, а**), либо поместить несколько электронов в зоне проводимости (полупроводники п-типа, **рис. 12.1.7, б**). Пустые уровни валентной зоны или электроны в зоне проводимости позволяют проводникам р-типа и п-типа проводить электричество. Атомы примесей приносят в своих ядрах ровно столько положительного заряда, сколько нужно, чтобы полупроводники р-типа и п-типа оставались электрически нейтральными.

Но когда полупроводники р-типа и п-типа соприкасаются, происходит нечто поразительное: в месте их контакта формируется р-п-переход (**рис. 12.1.7, в**). Чтобы

**Рис. 12.1.7.** (а) В полупроводнике р-типа недостает электронов (и положительно заряженных атомных ядер), и он может проводить электричество через свою частично заполненную валентную зону. (б) В полупроводнике п-типа имеется избыток электронов (и положительно заряженных атомных ядер), и он может проводить электричество через свою частично заполненную зону проводимости. (в) При контакте полупроводников р-типа и п-типа электроны с уровня проводимости полупроводника п-типа переходят в полупроводник р-типа, создавая в области р-п-перехода тонкий, электрически поляризованный обедненный слой. Этот р-п-переход ведет себя как полупроводниковый диод.



уменьшить свою потенциальную энергию, электроны с более высокой энергией из зоны проводимости полупроводника п-типа туннелируют через границу и заполняют свободные валентные уровни с более низкой энергией в полупроводнике р-типа. Такое перераспределение в пространстве создает локализованный заряд. Полупроводник п-типа приобретает суммарный положительный заряд, потому что теперь в нем меньше электронов, чем положительных зарядов. Полупроводник р-типа приобретает отрицательный заряд, потому что теперь в нем больше электронов, чем положительных зарядов. Электростатические силы, порождаемые локализованными зарядами, препятствуют дальнейшему прохождению электронов через р-п-переход и постепенно останавливают этот поток. Система приходит в равновесие.

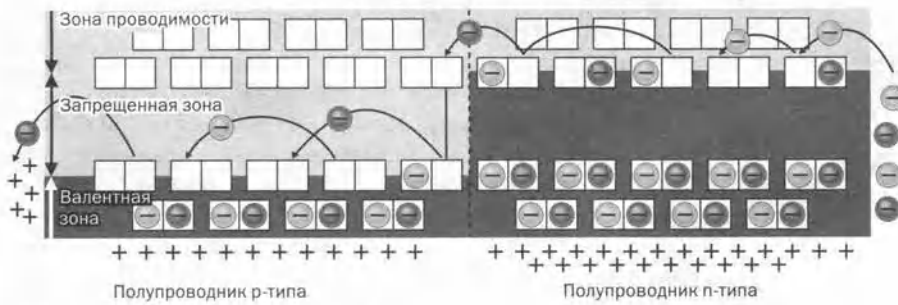
В области р-п-перехода при этом образуется обедненный слой — область, в которой после перехода электронов освободились все уровни проводимости и оказались заняты все валентные уровни. В отсутствие электронов на уровнях проводимости или свободных валентных уровней, обедненный слой не может проводить электричество и заряд не может проходить через р-п-переход. Обедненный слой является диэлектриком, а два полупроводника образовали диод.

В нашем “театральном” примере р-п-переход аналогичен залу, разделенному проходом на правую и левую половины. В левой (р-тип) балкон пуст и даже в партере есть несколько незанятых мест. В правой (п-тип) партер заполнен и даже на балконе сидят несколько человек. Так как обе половины разделены только проходом, зрители с правого балкона замечают свободные места в левой части партера, и некоторые из них — те, что сидят ближе к центру, — ухитряются перелезть вниз с правого балкона в партер и занять лучшие места в его левой части. Теперь вся центральная часть партера заполнена, а балкон опустел, образовав обедненную область, в которой некому двигаться влево или вправо. Театр не может работать “проводником”!

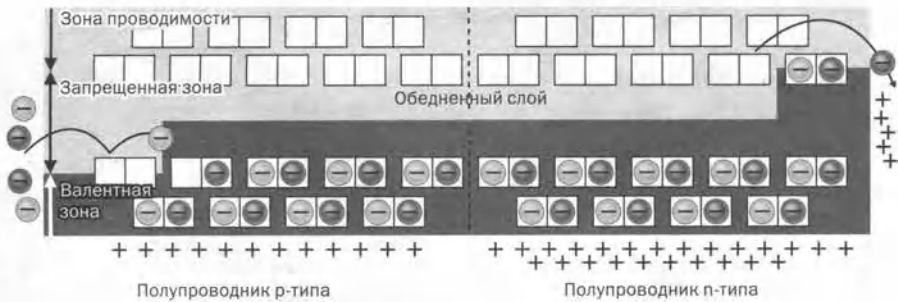
Теперь давайте посмотрим, что произойдет, если мы подсоединим провода к каждому полупроводнику и при помощи батареи попробуем направить электроны через р-п-переход. Если мы направляем электроны влево, забирая их с р-стороны и передавая п-стороне, обедненный слой становится тоньше и в конце концов исчезает (рис. 12.1.8, а). Мы подаем электроны на уровни проводимости п-типа и толкаем их в сторону р-п-перехода. Мы также извлекаем электроны с валентных уровней р-типа и утаскиваем их подальше от р-п-перехода.

Избыток электронов на стороне п-типа и дефицит электронов на стороне р-типа создают разность потенциалов между двумя частями диода. Когда потенциал р-стороны становится примерно на 0,6 В выше потенциала п-стороны, обедненный слой в кремниевом диоде исчезает. Электроны с уровней проводимости материала п-ти-

а) Диод с прямым смещением перехода



б) Диод с обратным смещением перехода



па свободно текут влево через р-п-переход и занимают свободные валентные уровни в материале р-типа. Таким образом, через р-п-переход идет электрический ток.

В нашей театральной аналогии мы запускаем новых зрителей с правой стороны на балкон п-типа и выводим из зала людей, которые сидели в левой стороне партера р-типа. Вновь прибывшие зрители на балконе могут выбирать себе места и проходить поближе к центру балкона. Аналогичным образом опустевшие места в партере р-типа позволяют зрителям пересаживаться вдоль ряда, так что освобождаются места ближе к центральному проходу. После этого люди, сидевшие на балконе п-типа, могут перейти на другую сторону — на балкон р-типа и затем спуститься в партер. В итоге наблюдается направленный влево поток людей через театральный зал. Зал пропускает зрителей справа налево.

Но что произойдет, если мы попытаемся пропустить электроны через диод в обратном направлении, забирая их с п-стороны и толкая в р-сторону (рис. 12.1.8, б)? В этом случае, по мере того как мы будем заполнять свободные валентные уровни на р-стороне и забирать электроны с уровня проводимости на п-стороне, обедненный слой будет становиться толще. Увеличивающийся обедненный слой воспрепятствует перемещению электронов, и через р-п-переход не будет идти ток. Р-п-переход останется диэлектриком.

Снова к театральной аналогии: мы выводим с балкона зрителей, занимавших места справа на балконе п-типа, и сажаем их в левую часть партера р-типа. Скоро на балконе п-типа почти никого не остается, а в партере р-типа все места оказываются занятыми. Никто не может сдвинуться с места, зал представляет собой обширный обедненный слой и ведет себя как диэлектрик.

Поскольку р-п-переход позволяет току течь в одном направлении и не позволяет — в обратном, следовательно, он представляет собой диод. Исторически сложилось так, что сторона р-типа называется анодом, а сторона п-типа — катодом. Ток, который мы рассматриваем как поток положительных зарядов, может протекать через диод только в направлении от анода к катоду. Поскольку ток естественным образом течет от высокого потенциала в сторону более низкого потенциала, ток через катод течет только в случае прямого смещения — когда потенциал анода больше, чем потенциал катода. В случае обратного смещения — когда потенциал анода меньше, чем у катода, — ток через диод не течет. Эта возможность контролировать направление тока имеет фундаментальное значение для преобразования переменного тока в постоянный.

Даже при прямом смещении диода обедненный слой не исчезнет, пока потенциал анода существенно выше, чем потенциал катода. Например, напряжение на

Рис. 12.1.8. (а) Если вы подадите электроны к р-п-переходу со стороны полупроводника п-типа и удалите их со стороны проводника р-типа, то обедненный слой исчезнет и через переход сможет протекать ток. (б) Если подавать электроны к р-п-переходу со стороны полупроводника р-типа и удалять их со стороны проводника п-типа, обедненный слой утолщается и ток не может течь через переход.

обычном кремниевом диоде должно составлять около 0,6 В для того, чтобы он мог проводить ток. При протекании тока через диод происходит падение потенциала, следовательно, каждый перенесенный заряд теряет часть своей энергии. Как правило, эта энергия теряется в виде тепла, но в главе 14 мы рассмотрим диоды, которые используют эту потерю энергии, чтобы излучать свет.

Выделение тепла представляет собой существенную проблему при использовании диодов и других полупроводниковых деталей, поскольку может привести к их перегреву. При соответствующем освещении благодаря тепловой энергии электроны могут перемещаться с валентных уровней полупроводника на уровни проводимости. Эта термоиндуцированная проводимость, незначительная при комнатной температуре, возрастает по мере разогрева полупроводника. Выше определенной температуры токи, обусловленные термоиндуцированной проводимостью, способствуют еще более сильному разогреву и в конце концов приводят к неуправляемому тепловому разрушению. Чтобы избежать подобных неприятностей, которые обычно сопровождаются появлением дыма и вконец испорченным настроением, полупроводниковые электронные устройства не должны чересчур сильно разогреваться, поэтому они часто снабжаются вентиляторами.

## Конденсаторы

Следующий новый для нас электронный компонент блока питания — конденсатор, устройство, которое накапливает отдельные электрические заряды (рис. 12.1.9). Конденсатор состоит из двух проводящих пластин, разделенных тонким слоем диэлектрика (рис. 12.1.10). Когда одна пластина заряжена положительно, а другая — отрицательно, противоположные заряды притягиваются друг к другу. Это притяжение позволяет пластинам накапливать большие количества разделенных зарядов, оставляя конденсатор в целом электрически нейтральным.

Конденсатор заряжают, передавая заряд с отрицательной пластины на положительную. Работа, которая при этом совершается, запасается в конденсаторе в виде электростатической потенциальной энергии и высвобождается, когда разделенным зарядам позволяют соединиться. Включенный в электрическую цепь заряженный конденсатор работает как батарея — он подает в цепь заряд с положительной пластины и забирает этот заряд из цепи на отрицательную.

Так как электростатическая энергия (положительного) заряда на положительной пластине больше, чем на отрицательной пластине, потенциал положительной пластины выше, чем потенциал отрицательной пластины. Разность потенциалов между пластинами пропорциональна величине разделенного заряда; чем больше разделенного заряда содержит конденсатор, тем больше разность потенциалов между его пластинами.

Разность потенциалов зависит также от устройства конденсатора. Увеличение пластин позволяет одноименным зарядам более свободно разместиться в каждой пластине и не так сильно отталкивать друг друга. Уменьшение изолирующего слоя между пластинами приближает противоположные заряды на двух пластинах, так что они могут сильнее притягивать друг друга. Оба эти действия снижают электростатическую потенциальную энергию разделенного заряда и, следовательно, уменьшают разность потенциалов между пластинами (более подробно о структуре конденсатора см. 2).

Эти же действия облегчают накопление заряда конденсатором, то есть увеличивают его емкость — отношение заряда, накопленного в конденсаторе, к разности потенциалов между его пластинами. В системе СИ единицей емкости является кулон/вольт, или фарад (раньше говорили “фарада”, сокращенно Ф, или F). Конденсатор с емкостью в 1 Ф емкости накапливает заряд невероятной величины даже при низкой разности потенциалов. Гораздо чаще можно встретить конденсатор с емкостью в одну миллиардную часть фарада.

Греческая буква  $\mu$  (“мю”) перед Ф означает миллионную долю, или микрофарад, сокращается как мкФ, или  $\mu\text{F}$ . Миллиардная доля обозначается приставкой нано-, нанофарад, сокращенно нФ, или pF. Пикофарад — это триллионная доля фарада, пФ, или pF. Емкость обычно указана на самом конденсаторе, часто в сокращенной форме.



Рис. 12.1.9. Конденсаторы накапливают электрический заряд. Каждый из этих конденсаторов содержит две проводящие пластины (обкладки), разделенные тонким изолирующим слоем.

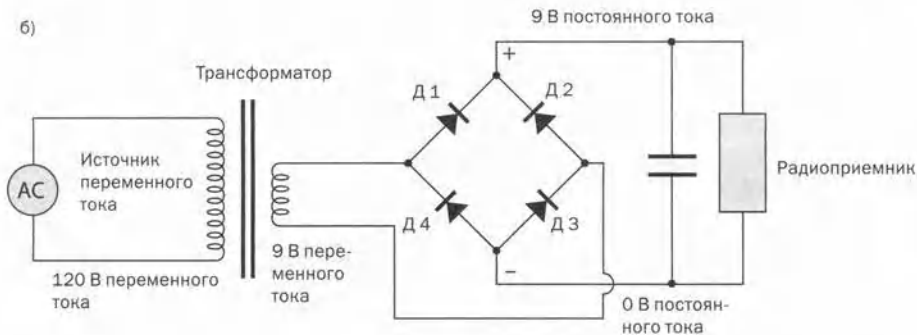
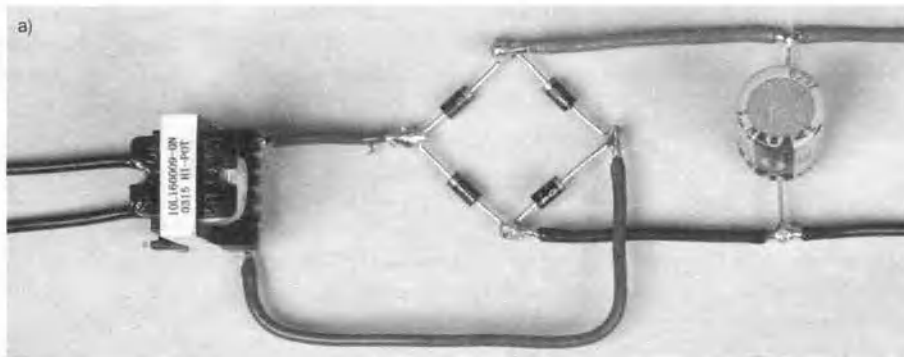
2 Простейший конденсатор — это всего лишь две пластины, разделенные диэлектриком, однако существуют конденсаторы, представляющие собой свернутый в рулон пластины металла и диэлектрика, напоминающие рулет с вареньем. В таком цилиндрическом конденсаторе даже при относительно небольших наружных размерах может поместиться квадратный метр конденсатора-“сэндвича”. Для производства некоторых конденсаторов используют химические процессы, в которых образуются огромные проводящие поверхности, разделенные тончайшим слоем химического диэлектрика. Две “пластины” в этом типе конденсатора сильно отличаются друг от друга — одна из них на самом деле представляет собой проводящее химическое вещество, которое называется электролитом. Из-за такого различия пластин электролитические конденсаторы имеют только один вариант накопления заряда. На одной пластине всегда накапливается только положительный заряд, на другой — только отрицательный.

## Блок питания в сборе

Наш блок питания снабжает радиоприемник постоянным током низкого напряжения при помощи трансформатора, четырех диодов и конденсатора. На **рис. 12.1.11, а** и **12.1.11, б** представлены соответственно фотография и схема соединения этих компонентов. Инженеры и ученые часто используют такие принципиальные схемы для представления сложных электронных устройств. Каждому электронному компоненту соответствует свой символ, электрическое соединение между компонентами обозначается линиями.

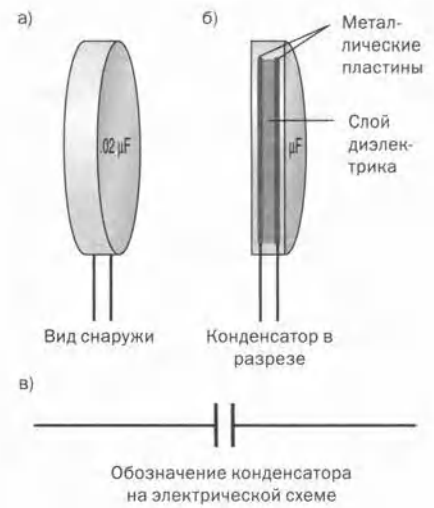
Давайте подробно рассмотрим **рис. 12.1.11**. Первый слева компонент — понижающий трансформатор. Первичная обмотка питается от сети переменного тока с напряжением 120 В, во вторичной обмотке индуцируется ЭДС 9 В переменного тока. Вторичная обмотка действует как источник переменного тока с напряжением 9 В.

Если бы вы подключили к выводам вторичной обмотки лампочку, рассчитанную на 9 В, индуцированная переменная ЭДС обмотки пустила бы переменный ток через нить накала лампы и лампа бы зажглась. Но если бы вы подключили ко вторичной обмотке радиоприемник, переменная ЭДС обмотки попыталась бы пропустить через него переменный ток, но это бы не сработало. В одиночку трансформатор не может обеспечить устойчивый постоянный ток, который нужен приемнику.



Проблему выпрямления переменного тока решают диоды (на **рис. 12.1.11** в центре), которые направляют ток так, чтобы он всегда шел к радиоприемнику по положительному проводу и возвращался по отрицательному. Несмотря на то что во вторичной обмотке трансформатора под действием переменной ЭДС продолжает возникать переменный ток, диоды Д1 и Д2 контролируют прохождение тока от вторичной обмотки к радиоприемнику, а диоды Д3 и Д4 — возвращение тока обратно на вторичную обмотку. Несмотря на то, что трансформатор поставляет переменный ток, благодаря диодам блок питания может служить источником постоянного тока.

Однако и диоды сами по себе не могут обеспечить стабильный постоянный ток. При колебаниях индуцированной ЭДС вторичной обмотки напряжение между отрицательным и положительным проводами также прыгает вверх-вниз. Напряжение поднимается примерно до 12 В, когда ЭДС достигает либо максимума, либо минимума, но падает до нуля, когда ЭДС меняет знак. Вместе трансформатор и диоды дают пульсирующий постоянный ток — форму знакопостоянного



**Рис. 12.1.10.** (а) Обычно конденсатор представляет собой диск или цилиндр с двумя торчащими из него проводами. На конденсаторе обозначена его емкость. (б) Внутри провода соединены с двумя проводящими пластинами, разделенными тонким слоем диэлектрика. (в) В электрических схемах конденсатор обозначают двумя параллельными черточками.

**Рис. 12.1.11.** (а) Этот блок питания состоит из трансформатора, четырех диодов и конденсатора. (б) Изображение того же устройства на электрической схеме.

тока, которая обеспечивает такую же среднюю мощность, как постоянный ток с напряжением 9 В, но с серьезными колебаниями напряжения. Поскольку между пульсациями радио будет выключаться, такое пульсирующее питание нам не подходит.

Конденсатор решает проблему пульсации, накапливая заряд и энергию всякий раз, когда пульсирующее напряжение приближается к максимуму и высвобождает заряд и энергию, когда пульсирующее напряжение постоянного тока находится вблизи минимума. Конденсатор действует как перезаряжаемая батарея: заряжается, когда энергия в избытке, и разряжается, когда ее не хватает.

Когда индуцированная ЭДС во вторичной обмотке велика, один из диодов D<sub>1</sub> или D<sub>2</sub> работает в режиме прямого смещения и контролирует ток, идущий от вторичной обмотки и на радиоприемник, и на положительную обкладку конденсатора. В это время один из диодов D<sub>3</sub> или D<sub>4</sub> также работает в режиме прямого смещения и контролирует ток, возвращающийся от радиоприемника и отрицательного вывода конденсатора на вторичную обмотку. Приемник получает необходимый ему постоянный ток, а конденсатор постепенно накапливает заряд. Разность потенциалов между обкладками конденсатора возрастает, он заряжается.

Когда индуцированная ЭДС во вторичной обмотке мала, все четыре диода работают в режиме обратного смещения и ток во вторичной обмотке останавливается. Функцию снабжения радиоприемника электроэнергией берет на себя конденсатор. Ток идет от положительной обкладки конденсатора по положительному проводу к радиоприемнику и возвращается от него по отрицательному проводу на отрицательный вывод конденсатора. Приемник по-прежнему получает необходимый ему постоянный ток, но теперь конденсатор постепенно теряет заряд. Разность потенциалов между обкладками конденсатора уменьшается, он разряжается.

Заряжаясь и разряжаясь подобным образом, конденсатор “фильтрует” пульсирующий ток, поступающий от трансформатора и диодов. Конденсатор сглаживает как пики, так и падения напряжения. Несмотря на то, что сглаженный постоянный ток все-таки слегка колеблется по мере зарядки и разрядки конденсатора, радиоприемник может на нем работать. Как и многие другие электронные устройства, работающие от блоков питания, радиоприемник имеет собственную систему сглаживания незначительных колебаний напряжения, чтобы они не влияли на его работу. До тех пор пока приемник непрерывно получает постоянный ток приблизительно нужного напряжения, он работает так же хорошо, как от батареи.

## Импульсные блоки питания

Простые блоки питания, которые я только что описал, недороги и надежны, однако у них есть ряд важных ограничений: напряжение, которое они обеспечивают, имеет все-таки несколько непостоянный, изменчивый характер; они не выдерживают значительных скачков напряжения питающей сети; в них используются относительно громоздкие и тяжелые трансформаторы. Этих недостатков лишены более сложные устройства, известные как импульсные источники питания.

В импульсном блоке питания трансформатор не подключается напрямую к розетке. Вместо этого ток из розетки через группу диодов — диодный мост — направляется к конденсатору. Конденсатор накапливает заряд и электростатическую потенциальную энергию, и разность потенциалов между его пластинами возрастает до величины, которая зависит от максимального амплитудного напряжения в сети (оно составляет 170 В для американской сети переменного тока 120 В и примерно 330 В для европейской сети 230 В).

Затем импульсный блок питания при помощи электронных переключателей преобразует постоянный ток, поступающий от заряженного конденсатора, в переменный ток высокой частоты для трансформатора. Использование высокочастотного переменного тока (обычно около 40 000 Гц) дает два огромных преимущества. Во-первых, можно использовать на удивление маленький понижающий трансформатор. Во-вторых, блок питания получает возможность регулировать выходное напряжение включением и выключением полученного переменного напряжения.

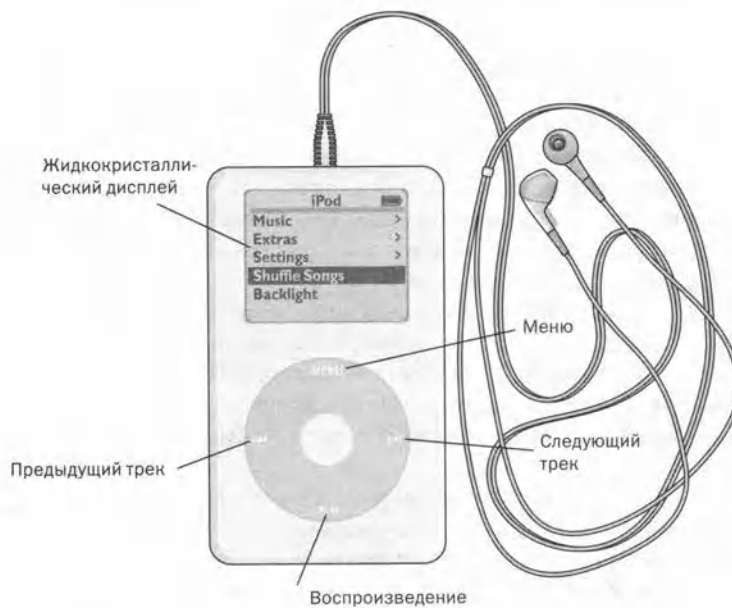


Импульсные блоки питания могут использовать очень маленький трансформатор, потому что его магнитному полю не нужно хранить много энергии. Ему достаточно иметь столько энергии, чтобы “продержаться” всего лишь половину цикла сети переменного тока, или примерно  $1/80000$  секунды. Сравните: трансформатор, который работает от сети переменного тока с частотами 60 или 50 Гц, должен запастись достаточно энергии, чтобы хватило соответственно на  $1/120$  или  $1/100$  долю секунды. Поскольку большая часть этой энергии хранится в железном сердечнике, увеличение частоты переменного тока почти в 1000 раз позволяет уменьшить массу железного сердечника трансформатора почти в 1000 раз. В целом, чем выше частота, на которой может работать импульсный блок питания, тем меньших размеров может быть его трансформатор. С этой точки зрения 40 000 Гц — удобный и разумный выбор. Так или иначе, в импульсных источниках питания избегают частот ниже 20 000 Гц, потому что трансформаторы все равно всегда слегка вибрируют, а на частотах ниже 20 000 Гц человеческое ухо способно слышать эту вибрацию.

Ток от вторичной обмотки трансформатора проходит через диоды к конденсатору, который затем подает постоянный ток на любую нагрузку, подключенную к блоку питания. Электронная система переключения, которая синтезирует высокочастотный переменный ток блока, следит за разностью потенциалов между обкладками конденсатора и регулирует процесс переключения, чтобы поддерживать эту разность на заданном уровне. Если разность потенциалов слишком велика, система на короткое время отключает синтезированный переменный ток, так что накопленный в конденсаторе заряд уменьшается и, соответственно, снижается разность потенциалов. Если же разность потенциалов слишком мала, переключатель включает синтезированный переменный ток для подзарядки конденсатора.

Полная электронная схема импульсного источника питания достаточно сложна. Она состоит из двух замысловатых электронных блоков: к первому относится все, что работает на входном напряжении сети до трансформатора, ко второму — то, что работает на низких напряжениях после трансформатора. Более того, эти два блока должны взаимодействовать по мере того, как устройство отслеживает и контролирует напряжение на выходе. Несмотря на эти сложности, импульсные блоки питания постепенно стали достаточно доступными и очень широко используются. Обычно они выглядят как кирпичики с взаимозаменяемыми шнурами питания, вы можете отличить их от других видов источников питания по способности работать в широком диапазоне напряжений и частот. Если на адаптере написано, что он работает в диапазоне 100–240 В переменного тока и 50–60 Гц, можете не сомневаться — это импульсный блок питания.

---



## 12.2 Аудиоплееры

Портативные аудиоплееры произвели революцию в музыке. Куда ни взглянешь, люди в наушниках слушают свои любимые мелодии при помощи этих маленьких чудес электроники. Отчасти компьютер, отчасти стереопроигрыватель — аудиоплеер эффектно совместил в себе ряд современных высоких технологий. Благодаря тому, что в аудиоплеере содержится много самых разнообразных электронных компонентов, он может послужить прекрасным примером для знакомства с основами современной электроники.

Чтобы понять, как работает аудиоплеер, нам нужно сначала разобраться, каким образом можно представить звук в электронной форме и как эту электронную форму можно хранить, извлекать и в конечном итоге использовать для воссоздания изначального звука. Для этого нам придется пройти долгий путь от цифрового мира компьютеров до аналогового мира стереоусилителей и наушников. И здесь нам не миновать рабочей лошадки современной электроники: транзистора. Первые электронные аудиоустройства работали на основе вакуумных трубок — довольно громоздких компонентов, которые к тому же расходовали впустую много энергии и быстро выходили из строя. Благодаря транзисторам аудиоустройства сделались намного более практичными, а компьютеры стали настолько компактными и доступными, что в каждом аудиоплеере теперь имеется свой собственный компьютер.

### Аналоговое и цифровое представление звука

Аудиоплеер не хранит звук — точно так же, как DVD не хранит мерцающий свет. Вместо этого аудиоплеер хранит представление (кодированную форму) звука, которое может использовать для воспроизведения звука, когда это потребуется. В памяти плеера хранится достаточно информации для почти идеального воспроизведения некоторого количества записей (треков). Но на пути от микрофона, который первоначально собрал звуковую информацию, до наушников, которые на последнем этапе воспроизводят звук, происходит целый ряд увлекательных электронных процессов. В этом разделе мы рассмотрим путь, который должен пройти звук от записи до воспроизведения. При этом нам предстоит изучить принципы работы не только аудиоэлектроники, но и цифровых компьютеров.

Наша первая задача в попытке проследить этот маршрут — это разобраться в двух различных способах, которые аудиоплеер использует для представления звука: аналоговом и цифровом. Давайте начнем с процесса записи и с того, какую информацию об исходном звуке при этом собирает плеер.

Из главы 9 мы узнали, что звук в воздухе представляет собой волны плотности и что вы слышите звуковую волну через соответствующие колебания давления воздуха. Аудиозапись имитирует наш слух, фиксируя изменения давления воздуха во времени и сохраняя эти измерения в каком-нибудь удобном формате. При проигрывании эта информация используется, чтобы воссоздать точную картину исходных колебаний давления воздуха и таким образом воспроизвести звук, созданный исполнителями.

Запись начинается с микрофона, который, в сущности, представляет собой чувствительный электромеханический датчик давления воздуха. Воспроизведение заканчивается наушниками — электромеханическими устройствами для изменения плотности и давления воздуха. Между микрофоном и наушниками размещено много сложной электроники.

Микрофоны и наушники соединяют мир настоящего живого звука с миром электронного звучания. Из микрофона выходит уже не сам звук, а электронное представление звука. Когда давление воздуха на микрофон колеблется вверх-вниз относительно атмосферного, микрофон производит ток, который соответствующим образом колеблется относительно нуля. Этот колеблющийся ток — аналоговое представление звука, то есть непрерывно изменяющаяся физическая величина (ток), которая соответствует другой непрерывно изменяющейся физической величине (давлению воздуха). Как и в случае любого аналогового представления, микрофон отображает аналогию между двумя непрерывно изменяющимися физическими величинами: ток выступает как аналог давления воздуха. Наушники — пример обратной аналогии.

Но если часть аудиоплееров продолжает использовать аналоговое представление звука, очень многие используют другое представление: цифровое. В цифровом представлении непрерывно изменяющаяся физическая величина выражается набором цифр — каждая из которых может принимать ограниченное количество дискретных значений.

При цифровом представлении звука изменения давления воздуха количественно измеряются в некоторых единицах и эти численные значения физической величины затем преобразуются в набор цифр. Цифровое представление широко используется в компьютерах, которые выражают в числах все, что только можно вообразить, а затем преобразуют эти числовые значения в набор цифр.

Предположим, что в данный момент давление воздуха в микрофоне на 124 единицы выше атмосферного давления. Сначала представим увеличение давления воздуха в виде числа 124, а затем представим число 124 как набор цифр. Например, 124 может быть разложено на десятичные цифры 1, 2, 4, а затем эти десятичные цифры можно представить тремя разными физическими величинами, например величиной заряда, силой тока или напряжением. Поскольку каждая из величин — заряд, ток или напряжение — должна представлять только целые числа от 0 до 9, их значения могут не быть очень точными. Если предполагается, что напряжение 4 В должно представлять цифру 4, то 3,9 В или 4,1 В все равно будут восприниматься как 4.

В повседневной жизни мы обычно раскладываем числа на единицы, десятки, сотни, тысячи — иными словами, на степени числа 10, — потому что мы думаем и работаем в десятичной системе. Но можно разложить числа на единицы, двойки, четверки, восьмерки, шестнадцать и так далее. Вместо использования числа 10 в разных степенях, как в десятичной системе, мы будем использовать степени числа 2. Такая система представления чисел через разные степени числа 2 называется двоичной системой счисления.

В десятичной системе число сто двадцать четыре, записанное как 124, содержит 1 сотню ( $10^2$ ), 2 десятка ( $10^1$ ) и 4 единицы ( $10^0$ ). Когда эти составные части складываются ( $100 + 20 + 4$ ), получается 124. В двоичной системе 124 пишется как 111100, то есть мы представляем число 124 как один раз 64 ( $2^6$ ), один раз 32 ( $2^5$ ), один раз 16 ( $2^4$ ), один раз 8 ( $2^3$ ), один раз 4 ( $2^2$ ), ноль раз 2 ( $2^1$ ), и ноль раз 1 ( $2^0$ ). Складывая эти части ( $64 + 32 + 16 + 8 + 4$ ), мы снова получаем 124.

Этот, на первый взгляд, сложный способ представления даже небольшого числа на самом деле очень полезен. Число разбивается на части, каждая из которых имеет только два возможных значения (в представляемом числе либо есть 32, либо нет). В двоичной системе для представления числа вам нужно всего два символа: 0 и 1.

Поскольку число 124 в двоичной системе записывается как 111100, его можно представить зарядом, током или напряжением семи отдельных объектов. Первые пять должны содержать единицы, в то время как последние два должны содержать нули. Например, если семь объектов — конденсаторы, первые пять могут содержать заряд, а последние два — не содержать. Устройство, задача которого заключается в том, чтобы распознавать, какое число представляют конденсаторы, измеряет их заряд. Обнаружив заряд в первых пяти конденсаторах (11111) и не обнаружив заряда в последних двух (00), устройство определит, что конденсаторы представляют двоичное число 111100 или десятичное 124.

Двоичная система очень удобна, потому что быстродействующие электронные устройства, которые оперируют только между двумя крайними значениями, относительно просто изготовить: ток — включен или выключен, напряжение — положительное или отрицательное, заряд — присутствует или отсутствует. Намного труднее изготовить быстродействующие устройства, которые обеспечивали бы определенные значения тока, заряда или напряжения, необходимые для десятичного или даже аналогового представления. На аналоговое представление также влияют электронные погрешности и шумы, потому что аналоговое устройство, которое пытается представить число 124 напряжением 124 В, может случайно произвести 123 В или 125 В. Представьте себе банкомат, который не может отличить сумму в 124 доллара от 123 или 125! И хотя для представления числа 124 в двоичной системе требуется по меньшей мере семь отдельных величин, нет никаких сомнений в том, о каком именно числе речь.

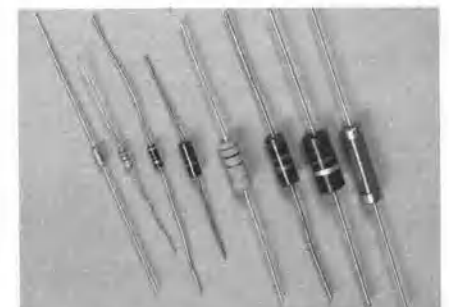
## Резисторы

Познакомившись со способами представления информации, мы готовы разбраться в том, что именно аудиоплеер делает с этой информацией. У нас уже есть основания догадываться, что эта информация передается по плееру в виде тока, напряжения и некоторых других физических величин. Но какие инструменты использует плеер для работы с этими физическими величинами?

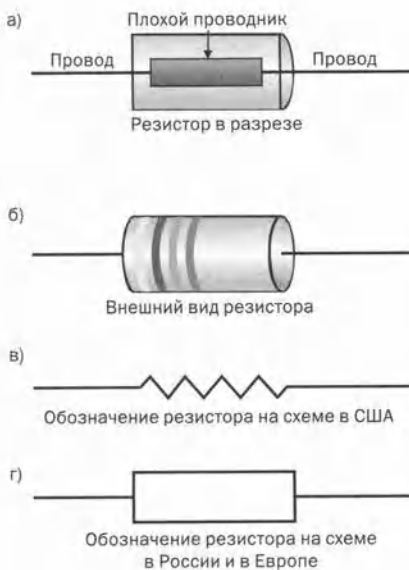
Инструменты эти главным образом электронные, и к счастью, многие из них нам уже знакомы. Мы уже сталкивались с конденсаторами, катушками индуктивности, трансформаторами и диодами — все они входят в состав аудиоплееров и большинства других электронных устройств. Однако существует по крайней мере два других электронных компонента, без которых не могут работать аудиоплееры или другие высокотехнологичные электронные устройства: резисторы и транзисторы.

Резистор — последний участник трио электронных компонентов, в которое входят также катушка индуктивности и конденсатор. Как мы видели в главе 11, катушка использует индуцированную ЭДС для создания напряжения, которое пропорционально скорости изменения тока во времени. Из предыдущего раздела нам известно, что конденсатор использует свою способность накапливать заряд для создания напряжения, которое пропорционально суммарному количеству тока за некоторый промежуток времени. Нам не хватает только устройства, которое использует свое электрическое сопротивление, чтобы создать напряжение, прямо пропорциональное току. Это недостающее устройство и называется резистором.

Резистор — это всего лишь два провода, соединенных между собой омическим устройством, неидеальным проводником электричества (рис. 12.2.1 и 12.2.2). Поскольку ток течет через омическое устройство лишь при наличии



**Рис. 12.2.1.** Резисторы омических устройств, препятствующие протеканию тока и создающие падение напряжения. Резисторы преобразуют некоторую часть электрической энергии тока в тепловую энергию. Чем больше резистор, тем больше тепловой энергии он может выдержать без перегрева.



**Рис. 12.2.2.** (а) Резистор представляет собой два провода, между которыми помещен неидеальный проводник электричества. (б) Резистор обычно заключен в цилиндрический корпус, с цветными полосками, обозначающими его сопротивление. (в) В электрических схемах резистор обозначают зигзагообразной линией\*. (г) Обозначение резистора на схеме в России и в Европе

\* В странах бывшего СССР чаще используется обозначение резистора в виде вытянутого прямоугольника, к серединам коротких концов которого подведены провода.

электрического поля, которое гонит заряды вперед, на токопроводящем резисторе должно происходить падение напряжения. В соответствии с законом Ома (см. раздел 10.3), это падение напряжения пропорционально силе тока, проходящего через резистор.

Однако падение напряжения на резисторе также пропорционально электрическому сопротивлению резистора, показывающему, насколько этот проводник неидеален. Чем больше сопротивление, тем меньше тока протекает через резистор при заданном падении напряжения. Некоторые из резисторов являются относительно хорошими проводниками (с “низким” сопротивлением), другие — относительно плохими (с “высоким” сопротивлением).

Как мы видели в разделе 10.3, электрическое сопротивление резистора определяется как падение напряжения на нем, деленное на силу протекающего через него тока, и измеряется в омах (сокращенно Ом, или  $\Omega$ ). Резистор с сопротивлением в несколько Ом — почти хороший проводник, в то время как резистор с сопротивлением в нескольких миллионов Ом — почти диэлектрик. Приставка “кило” и буква “к” означают тысячу (обозначается кОм), приставка “мега” и буква “М” означают миллион (обозначается МОм). Таким образом, резистор 100 кОм имеет сопротивление 100 000 Ом и резистор 10 МОм имеет сопротивление 10 000 000 Ом. Сопротивление резистора всегда обозначено на нем, причем часто в виде нескольких ярких цветных полосок. Десять различных цветов могут обозначать как цифры от 0 до 9, так и различные степени числа 10, так что резистор с коричневой (1), черной (0) и красной ( $\times 100$ ) полосами имеет сопротивление 1000 Ом.

## Транзисторы

Транзистор изобрели в 1948 году три американских физика: Уильям Шокли (1910–1989), Джон Бардин (1908–1991) и Уолтер Браттейн (1902–1987). Транзисторы (рис. 12.2.3) являются ключевым элементом почти всех современных электронных устройств. Как и диоды, транзисторы изготавливают из легированных полупроводников, таких как кремний с добавками химических примесей. Но в отличие от диода, который не дает току в цепи проходить в обратном направлении, транзистор позволяет току одной цепи контролировать ток в другой цепи.

Хотя существует много типов транзисторов, самый простой и наиболее важный тип — полевой транзистор. Правда, и полевые транзисторы бывают нескольких разновидностей, но мы сосредоточимся на том, который наиболее часто используется в аудиоплеерах, видеоустройствах и компьютерах: n-канальный металл-оксид-полупроводник или n-канальный МОП-транзистор (международное обозначение — MOSFET). Несмотря на свое сложное название, n-канальный МОП-транзистор представляет собой относительно простое устройство, состоящее из трех слоев полупроводника и соседствующей с ними металлической поверхности (рис. 12.2.4). Эти три слоя называются сток, канал и исток, а металлическая поверхность — затвор.

Сток и исток состоят из n-полупроводников с большим количеством примесей (много электронов на уровне проводимости), канал между ними состоит из полупроводника p-типа с малым количеством примесей (несколько пустых валентных уровней). При контакте эти три слоя образуют два встречно-параллельных p-n-перехода, и электроны с уровней проводимости стока и истока переходят в канал, чтобы заполнить его свободные валентные уровни (рис. 12.2.5, а). Таким образом, в целом в транзисторе образуется обширный обедненный слой, в котором нет ни свободных валентных уровней, ни занятых уровней проводимости. Этот слой простирается от стока до истока. Не имея возможности переносить заряд через канал, транзистор не может проводить ток между стоком и истоком.

Однако если бы каким-то образом удалось привлечь в канал больше электронов, эти электроны заняли бы уровни проводимости канала и канал начал бы вести себя как полупроводник n-типа. С каналом n-типа, зажатым, как кусок сыра в сэндвиче, между стоком n-типа и истоком n-типа, p-n-переходы исчезли бы, как и весь обедненный слой. Три слоя полупроводников образовали бы по сути единый полупроводник n-типа, и транзистор имел бы возможность проводить ток между стоком и истоком.

Задачу привлечения дополнительных электронов в канал извне выполняет металлоподобный затвор. Отделенный от канала чрезвычайно тонким слоем

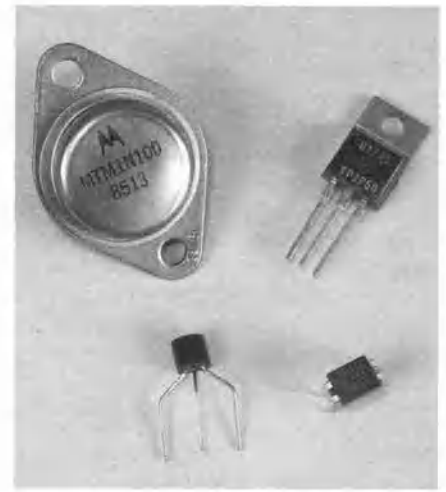


Рис. 12.2.3. Такие транзисторы позволяют при помощи небольшого электрического заряда управлять большими электрическими токами. Чем больше транзистор, тем больше электрической и тепловой энергии он может выдержать без перегрева.

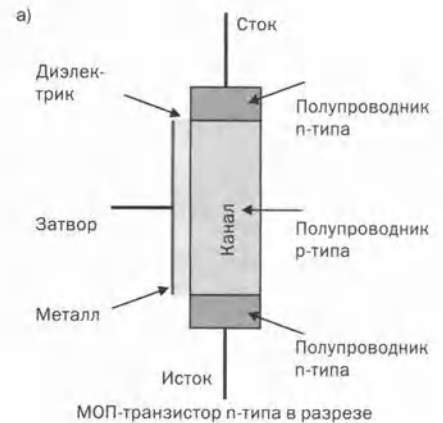


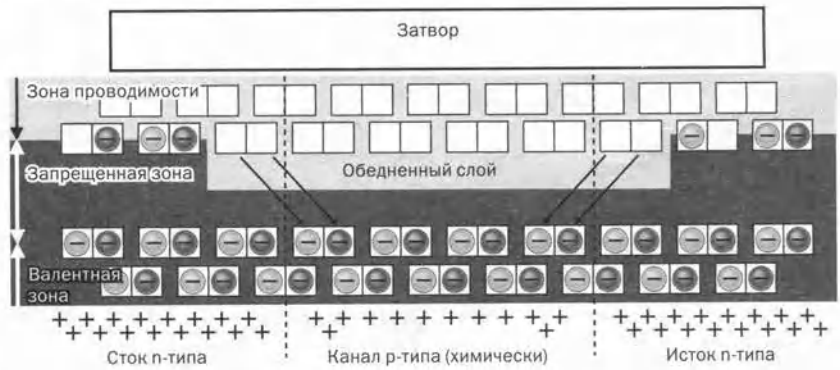
Рис. 12.2.4. (а) В n-канальном МОП-транзисторе канал, как правило, представляет собой обедненный слой, который не может проводить ток между истоком и стоком. Но когда положительный заряд на затворе притягивает электроны в канал, последний становится полупроводником n-типа и делает возможным протекание тока. (б) Обозначение n-канального МОП-транзистора на электрической схеме.

Рис. 12.2.5.

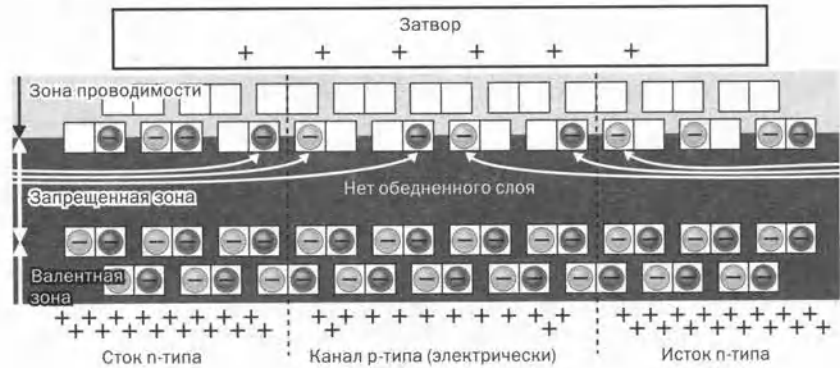
(а) При формировании p-канального МОП-транзистора электроны с уровней проводимости истока и стока заполняют пустые валентные уровни канала p-типа и образуют обширный изолирующий обедненный слой.

(б) Однако когда на затворе имеется положительный заряд, то под его действием электроны извне МОП-транзистора попадают в уровни зоны проводимости канала, и вся структура превращается в проводящий полупроводник n-типа.

а) МОП-транзистор n-типа выключен



б) МОП-транзистор n-типа включен



диэлектрика, затвор управляет способностью канала проводить ток. Когда на затвор по проводу поступает маленький положительный заряд, он притягивает электроны в уровни проводимости канала и транзистор начинает проводить ток (рис. 12.2.5, б). Чем больше величина положительного заряда на затворе, тем больше электронов попадает в канал и тем больше тока может протекать через транзистор. В результате транзистор ведет себя как регулируемый резистор с сопротивлением, которое уменьшается с ростом положительного заряда на затворе.

Теперь нам понятно, почему МОП-транзисторы называют p-канальными. Термин “p-канальный” относится к режиму работы канала как проводника p-типа, когда его затвор заряжен положительно и транзистор может проводить ток. Материал канала химически относится к полупроводникам p-типа, но когда в него попадают дополнительные электроны и он приобретает отрицательный заряд, то электрически он ведет себя как полупроводник n-типа. Словосочетание “металл-оксид-полупроводник” означает, что металлический затвор отделен от полупроводникового канала тонким изолирующим слоем оксида-диэлектрика. Этот слой очень легко нарушить, поэтому так много электронных устройств могут быть повреждены статическим электричеством. А “полевые” транзисторы называют, чтобы подчеркнуть, что именно электрическое поле от заряда на затворе притягивает электроны в канал и управляет протеканием тока через транзистор.

## Сохранение цифровой звуковой информации

Аудиоплеер — это наполовину компьютер и наполовину стереосистема. Он хранит звуковую информацию в цифровой форме и работает с ней, как компьютер, но затем усиливает эту информацию для наушников в аналоговой форме, как стереосистема. Исследуя электронику плеера, мы сохраним эту последовательность: начнем с цифровой памяти и систем обработки данных и закончим усилением звука.

В цифровой части аудиоплеера данные по измерению давления воздуха и другая информация представлены в двоичной системе. От того, насколько велики эти числа или насколько точны данные, зависит, сколько двоичных цифр необходимо для их представления. Каждая двоичная цифра называется бит, и использование большего

количества битов позволяет представлять большие или более точные цифры. В целом, чем детальнее информация, тем больше битов требуется для ее представления.

Для представления любого числа от 0 (который в двоичной системе обозначается 0000000) до 255 (в двоичной системе 1111111) достаточно восьми битов. Так как многие распространенные системы насчитывают менее чем 256 объектов, для описания этих объектов достаточно групп по восемь бит. Например, символам, которые используются в обычных текстах, были присвоены номера от 0 до 255, где буква “А” обозначается как 65. Так как группа из восьми битов 01000001 представляет число 65, она также представляет А. Группы из восьми битов настолько полезны и так часто применяются, что получили отдельное название — байты.

Несмотря на то, что звуковую информацию можно представить, используя один байт на каждое измерение давления воздуха, байт обычно не обеспечивает достаточной точности для качественного воспроизведения звука. Чаще всего при цифровой аудиозаписи используется два байта на каждое измерение давления. Эти измерения давления производятся десятки тысяч раз в секунду, как правило, при помощи нескольких микрофонов одновременно, чтобы обеспечить стереофонию или объемное звучание. Даже если для устранения избыточной или несущественной информации используются сложные методы сжатия данных, для представления альбома все равно требуется огромное количество битов. Итак, аудиоплееру нужен большой объем памяти.

У аудиоплеера, как и у любого компьютера, есть несколько способов хранения битов. В его основной рабочей памяти (которую чаще называют оперативной или памятью с произвольным доступом, а соответствующее устройство — оперативным запоминающим устройством, или ОЗУ), каждый бит — это крошечный конденсатор, который использует наличие или отсутствие электрического заряда для обозначения соответственно единицы или нуля. Плеер сохраняет бит, производя или удаляя заряд, и извлекает его из памяти, обращаясь к этому заряду.

Каждый конденсатор встроен в отдельный n-канальный МОП-транзистор. МОП-транзистор управляет потоком заряда, идущим к конденсатору или от него. Для сохранения или вызова бита аудиоплеер помещает положительный заряд на затвор МОП-транзистора, так что транзистор становится электропроводным. Запоминающая система затем может передавать заряд к конденсатору или от него.

Сохранение бита происходит относительно легко — плеер просто посылает соответствующий заряд на конденсатор через МОП-транзистор. Но считывание бита — гораздо более сложный процесс, потому что заряд на конденсаторе очень мал. Чувствительные усилители в запоминающем устройстве обнаруживают любую заряд, протекающий через транзистор от конденсатора, и сообщают о своей “находке” аудиоплееру. Поскольку в процессе чтения происходит разрядка конденсатора, система памяти должна немедленно пересохранить бит.

К сожалению, крошечные конденсаторы не могут долго сохранять заряд, потому что заряд стекает с конденсатора — происходит его саморазряд. Память, которая использует заряженные конденсаторы для хранения битов, называется динамической памятью и должна обновляться (считываться и восстанавливаться) сотни раз в секунду, чтобы единица случайно не превратилась в ноль или наоборот.

Динамическая память также очень недолговечна — при выключении аудиоплеера ее содержимое теряется. Чтобы сохранить батареи, плеер сохраняет музыкальную информацию в постоянной, или долговременной памяти. Эта память энерго-независима, то есть для хранения информации ей не нужна электроэнергия. Новые варианты энергонезависимой памяти появляются почти каждый год, но в настоящее время используются три основные формы: флеш-память, жесткие магнитные диски и оптические накопители. Пока что мы сконцентрируемся на флеш-памяти и магнитных дисках, а к оптическим накопителям вернемся в разделе 15.2.

Флеш-память похожа на динамическую память тем, что каждый бит сохраняется как наличие или отсутствие заряда, контролируемого МОП-транзистором. Но во флеш-памяти этот заряд находится на плавающем затворе МОП-транзистора — этот второй, незакрепленный затвор находится в слое диэлектрика между каналом и обычным затвором. Так как этот плавающий затвор окружен диэлектриком, он может сохранять заряд в течение десятков лет. И пока этот заряд сохраняется, он будет определять проводимость МОП-транзистора и, соответственно, значение бита — ноль это будет или единица.

Считывать биты с флеш-памяти легко, а вот сохранить их не так просто. Тот же диэлектрик, который сохраняет заряд на плавающем затворе в течение многих лет, мешает изменить этот заряд. Чтобы добавить или удалить электроны с плавающего затвора, запоминающее устройство должно приложить к истоку, стоку и обычному затвору МОП-транзистора относительно высокие напряжения. Образующиеся в результате сильные электрические поля позволяют электронам пересекать слой диэлектрика, отделяющий канал от плавающего затвора.

Чтобы поместить электроны на плавающий затвор, электрические поля разгоняют электроны в канале до таких высоких скоростей, что они буквально прорываются через слой диэлектрика к плавающему затвору. Для удаления электронов с плавающего затвора электрические поля располагаются так, что электронные стоячие волны с плавающего затвора искажаются и направляются в диэлектрик. Когда искаженные волны достаточно глубоко проникают в диэлектрик, электроны начинают течь через него в канал — процесс, известный как квантовое туннелирование. Мы вернемся к нему в главе 16.

Флеш-память быстро считывает информацию, но относительно медленно записывает. Кроме того, процесс перехода электронов сквозь диэлектрический слой приводит к его постепенному повреждению и ограничивает количество циклов записи флеш-памяти. Аудиоплеер комбинирует динамическую память и флеш-память: все текущие операции производятся в динамической памяти, долговременное хранение информации — во флеш-памяти.

Существует и другой вид памяти, более экономически эффективный, чем флеш-память, особенно если речь идет о хранении огромных массивов информации: память на магнитных дисках. Аудиоплееры, которые хранят десятки тысяч песен, обычно содержат магнитные (жесткие) диски. Эти устройства, которые для хранения музыки и другой информации используют магнитные эффекты, мы обсуждали в главе 11.

Так же как магнитная полоса на кредитной карте (рис. 11.1.6), поверхность магнитного диска может хранить информацию в ориентации его доменов. Жесткие диски представляют собой гладкие алюминиевые пластины с покрытием из высокотехнологичных твердых магнитных материалов. Используя микроскопические электромагниты для ориентации доменов и сложные полупроводниковые магнитные датчики для ее считывания, современные жесткие диски могут разместить почти четверть миллиарда бит на одном квадратном миллиметре поверхности (около 16 гигабайт на квадратный дюйм). Уже само обнаружение этих микроскопических битов на пластинах, которые вращаются со скоростью более 100 оборотов в секунду, можно считать чудом техники, тем не менее жесткие диски запросто это проделывают, даже когда вы слушаете аудиоплеер во время утренней пробежки.

## Компьютер аудиоплеера

Узнав, как можно представлять и хранить звуковую информацию в виде битов, давайте теперь рассмотрим, что делает с этими битами компьютер аудиоплеера. Цифровой обработкой данных занимаются электронные устройства, которые принимают одну группу битов на входе и производят другую группу битов на выходе. Так как выходные биты связаны с входными по правилам логики, эти электронные устройства называются логическими элементами.

Простейшим логическим элементом является инвертор, который просто изменяет значение входного сигнала на противоположное (рис. 12.2.6). Если входной бит инвертора имеет значение 1, то выходной бит равен 0, и наоборот. Инвер-



Рис. 12.2.6. Инвертор (изображен в виде символа) создает на выходе один бит, обратный входному биту.

Вход	Выход
1	0
0	1



торы используются для того, чтобы начать обратное действие — включить свет, который был выключен, начать проигрывание песни, которая была остановлена. Инверторы также используются как составная часть более сложных логических элементов.

Но инверторы — это не только абстрактные логические элементы, это и реально существующие электронные устройства. Они действуют на электрические входные сигналы и формируют выходные. В компьютере аудиоплеера инверторы и другие логические элементы представляют входные и выходные биты в виде электрических зарядов. Положительный заряд представляет единицу, отрицательный заряд представляет ноль. Таким образом, когда на вход инвертора поступает положительный заряд, на выходе инвертора появляется отрицательный заряд.

Инверторы и другие логические элементы обычно выполняются на основе п-канальных и р-канальных МОП-транзисторов. Мы уже знаем, что п-канальный МОП-транзистор проводит ток только в том случае, если его затвор заряжен положительно. Р-канальный МОП-транзистор, наоборот, проводит ток только в том случае, когда его затвор заряжен отрицательно. Сток и исток р-канального МОП-транзистора изготавливаются из полупроводников р-типа, а канал — из полупроводника п-типа. Так как п-канальные и р-канальные МОП-транзисторы в точности дополняют друг друга, построенные на них логические элементы называются комплементарными или КМОП-элементами. Компьютер аудиоплеера почти полностью построен на КМОП-элементах.

КМОП-инвертор состоит из одного п-канального и одного р-канального МОП-транзисторов (рис. 12.2.7). П-канальный МОП-транзистор подключен к отрицательному полюсу источника питания компьютера и контролирует подачу отрицательных зарядов на выход инвертора. Р-канальный МОП-транзистор подключен к положительному полюсу источника питания и контролирует поток поступающих на выход положительных зарядов. Когда на вход инвертора подается отрицательный заряд и передается на затвор МОП-транзистора, только р-канальный МОП-транзистор проводит ток и выход становится положительно заряженным. Когда на вход поступает положительный заряд, только п-канальный МОП-транзистор проводит ток, и выход становится отрицательно заряженным.

Однако компьютер нуждается и в других логических элементах, более сложных, чем инвертор. Один из них — логический элемент И-НЕ. Этот логический элемент имеет два входных бита и один выходной, и выходной бит равен единице, если только оба входных бита одновременно не равны единице (рис. 12.2.8). Элемент называется И-НЕ, потому что является обратным по отношению к логическому элементу И. Элемент И производит на выходе ноль, если оба входных бита не равны единице. Простые логические элементы, не имеющие памяти, часто называют вентилями.

В КМОП-микросхемах затвор И-НЕ использует два п-канальных и два р-канальных МОП-транзистора (рис. 12.2.9). Два п-канальных МОП-транзистора расположены последовательно (один за другим), так что ток, проходящий через один, должен также пройти и через второй. Если один из транзисторов имеет на затворе отрицательный заряд, то через последовательное соединение не будет идти ток. При таком соединении оба компонента несут одинаковый ток, но могут испытывать различное падение напряжения.

Два р-канальных МОП-транзистора подключают параллельно (один рядом с другим), так что на выход ток может течь через любой из них. Если один транзистор имеет на затворе отрицательный заряд, ток может течь от одной стороны пары к другой. При параллельном соединении компоненты делят ток, который получают по одному проводу, и совместно доставляют его ко второму. Несмотря на то, что параллельные компоненты могут неравномерно делить ток между собой, все они испытывают одинаковое падение напряжения.

### Параллельное и последовательное соединение

**Последовательное соединение.** Если компоненты соединены последовательно, один за другим, в цепочку, то для всех компонентов этой цепи сила тока одинакова, но могут быть различные падения напряжения. Общее падение напряжения от начала цепи к ее концу равно сумме отдельных падений напряжения на каждом компоненте.

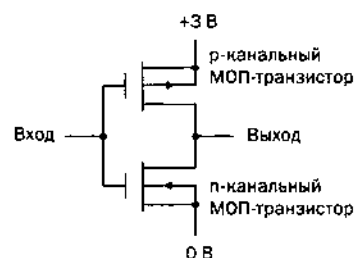


Рис. 12.2.7. Когда на вход КМОП-инвертора подается отрицательный заряд, его р-канальный МОП-транзистор (вверху) разрешает протекание положительного заряда на выход. Когда на вход подается положительный заряд, п-канальный МОП-транзистор (внизу) посылает на выход отрицательный заряд.



Вход 1	Вход 2	Выход
1	1	0
1	0	1
0	1	1
0	0	1

Рис. 12.2.8. Выходной бит логического элемента И-НЕ (показан в виде символа) равен единице, если оба входных бита одновременно не равны единице.

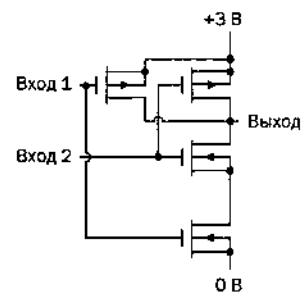


Рис. 12.2.9. У логического КМОП-элемента И-НЕ два входных бита. Когда через любой из входов поступает отрицательный заряд, цепочка п-канальных МОП-транзисторов (внизу) перестает проводить ток, а один из двух р-канальных (вверху) позволяет положительному заряду достичь выхода. Отрицательный заряд может достичь выхода только в том случае, если оба входа заряжены положительно.

**Параллельное соединение.** Если компоненты соединены параллельно, один рядом с другим, так что все они подключены к одной и той же паре проводов и объединены двумя узлами, то падение напряжения на всех компонентах одинаково, а сила тока может различаться. Полный ток, протекающий между узлами, равен сумме отдельных токов, протекающих через каждый компонент.

Если отрицательный заряд поступает на любой вход логического КМОП-элемента И-НЕ, последовательность п-канальных МОП-транзисторов будет непроводящей, а один из р-канальных МОП-транзисторов доставит положительный заряд на выход. Если же на оба входа поступает положительный заряд, то р-канальный МОП-транзистор будет непроводящим и последовательность п-канальных МОП-транзисторов доставит отрицательный заряд на выход. Таким образом, логический КМОП-элемент И-НЕ действует в строгом соответствии с правилами логики.

Комбинируя эти два логических элемента, инвертор и логический И-НЕ, можно получить любой возможный логический элемент. Например, их можно использовать для создания сумматора — устройства, которое суммирует числа, представленные двумя группами входных битов, и создает группу выходных битов, представляющих сумму. В свою очередь, из сумматоров можно сделать мультипликаторы (устройства для умножения), а мультипликаторы могут быть встроены в еще более сложные устройства. В итоге из простейших логических элементов можно построить весь компьютер.

Но на самом деле компьютер состоит не только из элементов И-НЕ и инверторов. Чтобы увеличить быстродействие и уменьшить размеры, в компьютере используются еще несколько основных логических элементов. Как и КМОП, И-НЕ-затвор и инвертор, эти элементы состоят непосредственно из п-канальных и р-канальных МОП-транзисторов.

Чтобы получить компьютер, все эти логические элементы соединяют друг с другом проводами в разнообразные хитроумные схемы. В аудиоплеере компьютер извлекает и обрабатывает музыкальную информацию и готовит ее для воспроизведения электронными нецифровыми устройствами. Последняя задача компьютера — передать цифровую музыкальную информацию (измерения давления воздуха) в цифро-аналоговый преобразователь, или ЦАП. Это электронное устройство связывает два способа представления информации, цифровой и аналоговый. Музыкальная информация выходит из ЦАП уже как напряжение, пропорциональное давлению воздуха. Это напряжение подается на вход основного аналогового компонента аудиоплеера: звукового усилителя. Вообще-то в аудиоплеере есть две полных аналоговых аудиосистемы, чтобы он мог производить стереозвук. Но так как эти системы идентичны, мы расскажем лишь об одной из них.

## Усилитель аудиоплеера

Колебания напряжения, поступающие из ЦАП-аудиоплеера, часто называют звуковым сигналом, потому что он представляет звуковую информацию. Многие виды аналогового или цифрового представления информации называются сигналами, включая видеосигналы, сигналы данных и даже сигналы поворота. Но в то время как аудиосигнал аудиоплеера содержит всю информацию, необходимую для воспроизведения оригинального звука, в удобном аналоговом формате, ему не хватает мощности, чтобы наушники могли воспроизвести его с нужной громкостью. Сначала требуется увеличить аудиосигнал; иными словами, он должен быть усилен.

Устройства, которые увеличивают различные характеристики сигналов, называются усилителями. Усилитель звука предназначен для увеличения сигналов в диапазоне частот, которые мы слышим или чувствуем (от 20 Гц до 20 000 Гц). Он состоит из двух отдельных контуров (входной и выходной цепи) и использует небольшой ток, проходящий по входной цепи, для управления гораздо более сильным током, проходящим по выходной цепи. Таким образом, усилитель обеспечивает более высокую мощность в выходной цепи, чем получает от входной цепи.

На рис. 12.2.10 показана схема простого усилителя, состоящего из компонентов, с которыми мы только что познакомились. В этом усилителе их пять: п-канальный МОП-транзистор, два резистора и два конденсатора. Питается усилитель от 9-вольтовой батареи (или эквивалентного блока питания) и усиливает

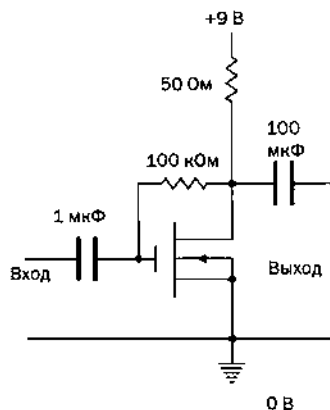


Рис. 12.2.10. Простой усилитель звука можно построить из одного п-канального МОП-транзистора, двух резисторов и двух конденсаторов. Источником питания служит батарея 9 В.

очень слабый переменный ток во входной цепи до достаточно сильного переменного тока в выходной цепи.

Чтобы понять, как работает этот усилитель, давайте сначала мысленно удалим все компоненты, кроме МОП-транзистора и резистора 50 Ом (рис. 12.2.11). Эти детали соединены последовательно, так что любой ток, который проходит через один компонент, должен также пройти через второй. Когда МОП-транзистор не проводит ток, ток не течет также и через 50-омный резистор. Соответственно, на резисторе не происходит падения напряжения. Таким образом, напряжение в точке А равно 9 В. Но когда транзистор проводит ток, на резисторе возникает падение напряжения и напряжение в точке А уменьшается.

Транзистор проводит ток только в том случае, когда на его затвор подается положительный заряд. Это можно сделать, соединив затвор с точкой А через резистор с сопротивлением 100 кОм (рис. 12.2.12). Так как напряжение в точке А составляет 9 В, она заряжена положительно и заряд перемещается в сторону более низкого напряжения. Ток начинает течь через резистор от точки А к затвору. Но по мере того как на затворе накапливается положительный заряд, транзистор начинает проводить ток и напряжение в точке А падает. Когда напряжение в точке А уравнивается с напряжением на затворе, ток через резистор течь перестает.

Теперь усилитель находится в состоянии устойчивого равновесия: напряжение в точке А составляет примерно 5 В, а на затворе транзистора имеется некоторое количество заряда. Резистор с сопротивлением 100 кОм обеспечивает обратную связь транзистора, то есть сообщает транзистору информацию о текущем состоянии в точке А; транзистор может использовать эту информацию для корректировки и улучшения ситуации. Хотя обратная связь замедляется из-за большого электрического сопротивления резистора, она постоянно действует, способствуя тому, чтобы напряжение в точке А возвращалось к своему равновесному значению. Если транзистор проводит слишком мало тока, заряд перетекает на его затвор и заставляет его проводить больше. Если транзистор проводит слишком много тока, заряд стекает с затвора, в результате чего транзистор проводит меньше тока.

Теперь усилитель чрезвычайно чувствителен к малейшим изменениям заряда на затворе транзистора. Если добавить на затвор чуть-чуть положительного заряда, напряжение в точке А идет вниз. Если удалить с затвора совсем немного положительного заряда, напряжение в точке А растет. Хотя ток в резисторе обратной связи пытается отменить эти изменения, он действует слишком медленно, чтобы помещать краткосрочным колебаниям. Входной сигнал усилителя успешно добавляет или удаляет положительный заряд с затвора, в результате чего появляется выходной сигнал усилителя, исходящий из точки А.

В усилитель входят два провода. Ток, представляющий аналоговый аудиосигнал, поступает в усилитель по одному проводу и возвращается по другому. Но звуковой сигнал не направляется непосредственно к затвору. Вместо этого он подключается к затвору через конденсатор (12.2.13). Помимо хранения заряда и энергии, конденсатор способен также передавать ток между двумя проводами, которые имеют разное напряжение. Такая гибкость напряжения играет важную роль в аудиоусилителях на батареях, которые должны проделывать всю работу по усилению исключительно при помощи положительных напряжений. Благодаря входному и выходному конденсаторам, наш усилитель звука может иметь среднее рабочее напряжение около +5 В и средние входное и выходное напряжения 0 В.

Чтобы понять, как конденсатор передает ток, давайте проследим за движением тока, который поступает на входной конденсатор нашего усилителя (слева направо). По мере того как положительный заряд тока накапливается на левой пластине конденсатора, он перетягивает отрицательный заряд с затвора на правую пластину конденсатора. Конденсатор остается электрически нейтральным, но затвор получает больший положительный заряд. В итоге получается, что конденсатор передал входной ток на затвор, хотя фактически через изолирующий слой конденсатора не проходило никакого заряда и две его пластины остались под различными напряжениями.

С помощью входного конденсатора колеблющийся входной ток усилителя вызывает колебания заряда на затворе транзистора, в результате чего колеблется и напряжение в точке А. Даже крошечные колебания входного тока создают заметные колебания напряжения в точке А.

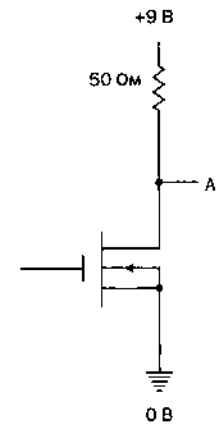


Рис. 12.2.11. Напряжение в точке А зависит от сопротивления МОП-транзистора. Заштрихованный треугольник внизу обозначает заземление.

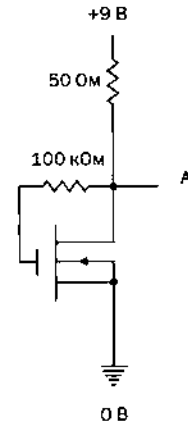


Рис. 12.2.12. Резистор с сопротивлением 100 кОм передает положительный заряд на затвор, пока напряжение в точке А не упадет до 5 В.

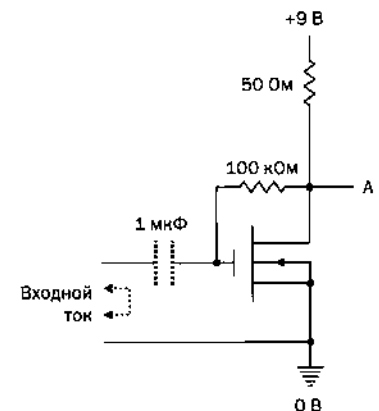


Рис. 12.2.13. Колебания тока во входных проводах влияют на заряд на затворе и, соответственно, на напряжение в точке А.

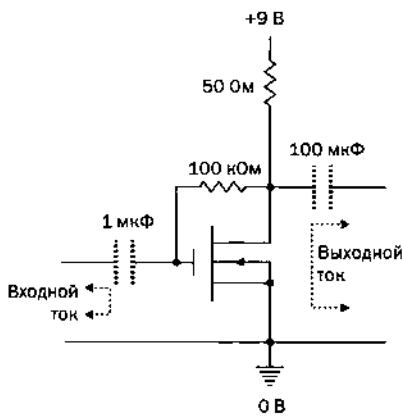


Рис. 12.2.14. Усилитель вызывает колебания тока в выходных проводах. Переменный ток на выходе повторяет колебания переменного тока на входе, однако в большем размере.

Именно эти колебания напряжения отвечают за колебания тока в наушниках. Хотя наушники не являются истинно омическим устройством, они реагируют на колебания напряжения, проводя колеблющиеся токи. Когда к двум проводам наушников прикладывается колеблющееся напряжение, через наушники идет колеблющийся ток, что производит соответствующие колебания давления и звук.

Однако среднее напряжение в точке А составляет около 5 В, в то время как для наушников ожидаемое значение падения напряжения — 0 В. Чтобы передать колебания напряжения и тока от точки А до наушников, невзирая на большую разницу в напряжениях, усилитель соединяет их через выходной конденсатор (рис. 12.2.14). Как и во входном конденсаторе, колебания тока и напряжения на левой пластине выходного конденсатора зеркально отражаются колебаниями тока и напряжения на правой пластине. Несмотря на то что усилитель работает при высоком среднем напряжении, выходной сигнал для наушников имеет среднее напряжение 0 В.

Очень слабые колеблющиеся токи во входной цепи усилителя производят сильные колеблющиеся токи в его выходной цепи. Этот усилитель, учитывая его простоту, работает на удивление хорошо. Если вы подключите микрофон к входу устройства, а наушники — к выходу, наушники прекрасно справятся с воспроизведением звука от микрофона.

Тем не менее наш простой усилитель нельзя назвать совершенным. Он до некоторой степени искажает звук и не все частоты или амплитуды звука обрабатывает одинаково хорошо. Кроме того, он напрасно тратит значительное количество электроэнергии на нагрев 50-омного резистора. Усилители в аудиоплеерах успешно решают эти проблемы. Большинство из них, чтобы сделать выходные сигналы почти идеальными копиями входных сигналов, только большей силы, использует обратную связь. Такие усилители способны определять свои недочеты и сами их исправлять.

Однако полное повторение входного сигнала не всегда желательно. Иногда вы хотите увеличить громкость каких-то звуков. Предусмотренная в аудиоплеере регулировка тембра позволяет выборочно изменять объемы для высоко- и низкочастотной областей звука.

Усилитель обычно оценивают по максимальной мощности, которую он может выдать на наушники (или колонки), и его средняя мощность не должна достигать этого значения. Но иногда усилитель может достигать максимальной мощности даже при воспроизведении совсем негромких пассажей. Причина в том, что звуковые волны часто взаимодействуют друг с другом (вспомните раздел 9.3 об интерференции волн). Когда гребни и впадины волн в микрофоне накладываются друг на друга, усиливающая интерференция может на короткое время вызвать огромные скачки давления. Чтобы правильно воспроизвести это наложение волн, усилитель должен быть в состоянии (хотя и на очень короткое время) увеличить мощность в несколько раз по сравнению со своей средней мощностью. Если усилитель не может этого сделать, звуковой сигнал в наушниках искажается и возникают неприятные помехи. Вот почему истинные аудиофилы часто используют мощные усилители, даже когда слушают тихую и спокойную музыку.

Что касается самих наушников, то они обычно используют электромагнитные эффекты для того, чтобы поверхность их динамиков колебалась синхронно с колебаниями тока усилителя. В большинстве случаев ток усилителя передается через прикрепленную к подвижной мембране катушку, находящуюся в сильном магнитном поле. На ток со стороны магнитного поля действует сила Лоренца, которая заставляет катушку и мембрану колебаться синхронно с колебаниями тока. Движущаяся мембрана попеременно сжимает и разрежает воздух, тем самым производя звук, соответствующий исходному.

## Пределы быстродействия компьютера

Компьютеры выполняют вычисления чрезвычайно быстро. Простой логический элемент И-НЕ, который мы рассмотрели выше, осуществляет свое действие в течение каких-то 120 пс (120 пикосекунд, или  $120 \times 10^{-13}$  с). За это время МОП-транзистор успевает начать или прекратить протекание тока, а заряд на выходном проводе достигает заданной величины. Так как ученые и инженеры постоянно улучшают характеристики МОП-транзисторов, логические элементы КМОП с каждым годом становятся быстрее.

Но быстродействие компьютера также зависит от времени прохождения сигналов между логическими элементами. И хотя сигнал от одного элемента передается другому почти со скоростью света, скорость передачи данных все-таки ограничивает быстродействие компьютера. Каждый элемент должен дождаться прибытия сигнала, поэтому плотная упаковка элементов сокращает время ожидания.

Возникает вопрос: если сами заряженные частицы путешествуют по проводам гораздо медленнее, чем свет, то каким же образом сигналы передаются со скоростями, близкими к скорости света? Это можно понять, представив себе садовый шланг, присоединенный к закрытому крану с водой. Когда вы открываете кран, вода начинает поступать в шланг. Если шланг уже был заполнен водой, вода польется из шланга задолго до того, как свежая вода из крана далеко продвинется по шлангу. И действительно, вода начинает течь из шланга почти сразу, как только вы открываете кран. Дело в том, что скачок давления воды, который происходит, когда вы открываете кран, передается по шлангу со скоростью звука.

Аналогичным образом, когда заряд входит в провод, его электрическое поле толкает впереди себя одноименный заряд. Нечто, напоминающее скачок давления, устремляется по проводу почти со скоростью света, и одноименный заряд начинает вытекать из дальнего конца провода задолго до того, как туда дойдет исходный заряд. Поскольку свет проходит расстояние в метр примерно за 3 нс (наносекунды, или  $3 \times 10^{-9}$  с), собрать весь компьютер на одной интегральной схеме размером с монету — прекрасная идея. Логические элементы при этом оказываются так близко друг к другу, что могут обмениваться сигналами с огромной скоростью.

Но есть и еще одно препятствие, замедляющее компьютер. Всякий раз, как логический элемент меняет свое значение с 1 на 0 или с 0 на 1, он должен изменить заряд на выходном проводе. Если провод длинный и широкий, на нем остается некоторое количество старого заряда. Удаление старого заряда и замена его новым требует времени, потому что через крошечные МОП-транзисторы в логическом элементе может протекать только очень маленькое количество тока.

Поскольку у проводов, соединяющих логические элементы, площадь поверхности гораздо больше, чем затвор МОП-транзисторов, большая часть заряда в итоге оказывается на проводе. Провода выступают в качестве конденсаторов, накапливающих и высвобождающих заряд. Лучший способ ускорить компьютер — сделать эти провода как можно короче и тоньше. В настоящее время провода в компьютерах достигли толщины 90 нм (90 нанометров) и становятся все тоньше. Чем меньше сечение, тем быстрее. Кроме того, они теперь лучше проводят электричество: алюминиевые провода теперь часто заменяют медными.

Перенос заряда на провода и затворы и обратно — не только вопрос скорости, это также вопрос энергии. Каждый раз, когда положительный заряд попадает в провод и затем сменяется отрицательным зарядом, в сумме происходит перенос положительного заряда от положительного вывода источника питания к его отрицательному выводу. Компьютер при этом потребляет небольшое количество электрической энергии, которую преобразует в тепловую. Если компьютер не может достаточно быстро избавиться от этой тепловой энергии, он перегревается.

Потребляемая мощность компьютера зависит от протекающего через него тока и падения напряжения на логических элементах. Один из способов уменьшить мощность — замедлить работу компьютера, реже изменяя заряд и медленнее передавая его от одного вывода источника питания к другому. Но мощность также можно понизить, уменьшая размеры провода и используя более низкие напряжения для подачи заряда в эти провода и обратно. Некоторые компьютеры в настоящее время работают при падениях напряжения до менее 1 В.

## Синхронизация компьютера

Поскольку действие каждого из логических элементов компьютера требует хоть и малого, но конечного (определенного) промежутка времени, компьютер должен регулировать процессы вычислений, чтобы более быстрые элементы не обгоняли медленные. Например, если компьютер пытается сложить два числа, которые сами являются результатами других вычислений, его сумматор, прежде чем произвести сложение, должен удостовериться, что промежуточные вычисления закончены. Чтобы избежать ошибок и неопределенности, компьютеру нужно

устройство, которое могло бы измерять время и сообщать тому или иному логическому элементу, что все предыдущие расчеты закончены.

Роль синхронизирующего устройства играют часы компьютера. Подобно тому, как дирижер оркестра задает темп и организует слаженную игру музыкантов, так и равномерный ход электрических часов компьютера заставляет все логические элементы «шагать в ногу». Один удар (один импульс) компьютерных часов — начинается новая группа вычислений. Следующее биение — первая группа должна наверняка завершиться, начинается вторая группа. Третье биение — вторая группа вычислений завершена, начинается третья.

Часы компьютера должны идти достаточно медленно, чтобы в течение такта (промежуток времени между биениями) все логические элементы успевали выполнить свои задачи. Так как некоторые задачи гораздо сложнее, чем другие, для первых может быть предусмотрена возможность выполнения за два или более такта. Примером такой сложной задачи является арифметическое деление. Вместо того чтобы замедлить часы так, чтобы деление можно было завершить за один такт, компьютер позволяет отвечающему за деление логическому элементу работать в течение нескольких тактов. Всякий раз, когда элемент деления активируется, остальные логические элементы компьютера, как правило, ждут, пока он не завершит свою работу.

Часы компьютера, на котором указана тактовая частота процессора 3 ГГц, совершают 3 000 000 000 биений в секунду. Это означает, что между биениями проходит 333 пикосекунды и что большинство логических элементов компьютера может выполнить свои задачи за этот промежуток времени. Часы в современных компьютерах совершают несколько миллиардов биений в секунду, и по мере того, как компьютеры будут становиться еще меньше, тактовая частота будет расти.

## Вакуумные электронные приборы

Вакуумные лампы редко используются в современной бытовой электронике, однако они по-прежнему часто применяются в радиопередатчиках, поскольку эти лампы могут обрабатывать сигналы большой мощности. Простая вакуумная лампа состоит из трех частей: нити, сетки и пластины (рис. 12.2.15). Эти части заключены в стеклянную или керамическую оболочку, внутри которой вакуум. Нить докрасна нагревается протекающим через нее током, и часть электронов получает столько тепловой энергии, что покидает ее поверхность. Процесс непосредственного перехода электронов в вакуум получил название термоэлектронной эмиссии.

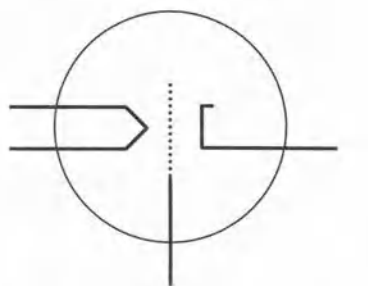
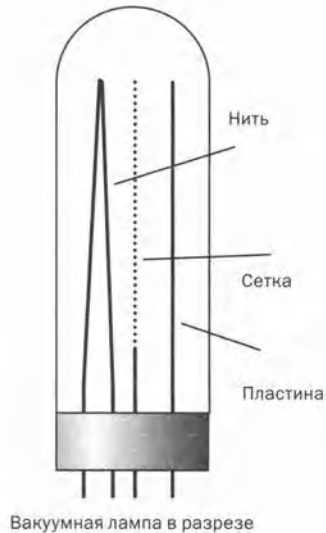
Если пластина заряжена положительно, она притягивает эти свободные электроны и поток электронов движется через вакуум к пластине — то есть между нитью и пластиной течет ток. Поскольку под током подразумевается поток положительных зарядов, формально ток течет от пластины к нити. Фактически вакуумная лампа действует как диод, поскольку проводит ток только в одном направлении.

Существуют вакуумные диоды, которые именно так и работают. Но в вакуумной лампе, изображенной на рис. 12.2.15, есть еще и сетка, установленная между нитью и пластиной. Эта проволочная сетка регулирует прохождение электронов от нити к пластине.

Когда сетка не заряжена, большая часть электронов пролетает сквозь сетку и летит дальше к положительно заряженной пластине. Но если сетка отрицательно заряжена, она отталкивает электроны и не дает им достичь пластины. Достаточно совсем небольшого отрицательного заряда на сетке, чтобы остановить ток большой силы от пластины к нити.

При таком режиме работы вакуумная лампа позволяет небольшому электрическому сигналу на сетке управлять током большой силы между пластиной и нитью. Лампа усиливает слабый сигнал на сетке, создавая аналогичный, но гораздо более сильный сигнал в цепи, подключенной к пластине.

Вакуумные лампы — хорошие усилители, но им требуется горячая нить, которая рано или поздно изнашивается. Когда нить выходит из строя, приходится менять всю лампу. Однако изготовление вакуумной лампы — сложный процесс, вакуумные лампы дороги, и частая их замена весьма неудобна. Кроме того, нить постоянно потребляет электроэнергию, при этом нагревается вся лампа. С учетом всех этих недостатков ничего удивительного, что почти во всех устройствах вакуумные лампы вытеснены транзисторами.



**Рис. 12.2.15.** Раскаленная нить вакуумной лампы испускает электроны, которые притягивает положительно заряженная пластина. Но если между нитью и пластиной стоит отрицательно заряженная сетка, то она будет отталкивать электроны и ток не потечет.

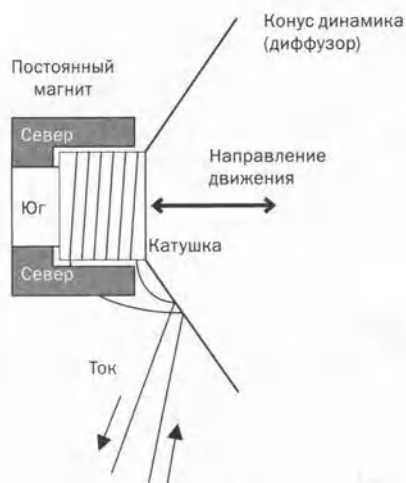
## Акустические системы

Электромагнитный динамик использует электрический ток, представляющий звук, для того, чтобы фактически воспроизвести этот звук. В основе динамика — неподвижный постоянный магнит и подвижная катушка (рис. 12.2.16). В постоянном магните вырезан цилиндрический канал, в который входит катушка. Противоположные полюсы постоянного магнита расположены внутри и снаружи канала. Когда по катушке течет ток, то она под действием силы Лоренца совершает колебательные движения — в канал или из канала, в зависимости от направления тока.

Катушка прикреплена к конусу (диффузору) динамика, который колеблется вместе с ней. Конус свободно крепится по окружности основания к колонке (корпусу акустической системы). Массы катушки и конуса невелики, поэтому оба компонента двигаются очень легко. Главный источник сопротивления их движению — сам воздух. Когда конус движется наружу, он сжимает воздух перед собой, когда движется внутрь — воздух перед ним разрежается. Быстро двигаясь туда и обратно, конус динамика производит звук.

К сожалению, идеальных динамиков не бывает. Маленький динамик быстро реагирует на электрический ток, даже на высоких частотах, но ему “не хватает воздуха”, чтобы произвести громкий низкий звук. Большой динамик с легкостью толкает воздух, но он слишком массивен, чтобы достаточно быстро отреагировать на высокие частоты. Наушникам не нужен большой объем воздуха, они используют один маленький динамик для каждого уха. В акустических системах для помещений, однако, часто используются несколько динамиков: маленькие высокочастотные громкоговорители для высоких звуков, большие низкочастотные для низких звуков и так называемые сабвуферы для звуков настолько низких, что вы скорее ощущаете их, чем слышите.

Некоторые небольшие динамики по способу излучения звука вообще не относятся к электромагнитным; они пьезоэлектрические. Как и кристаллы кварца, используемые в часах (с. 319), пьезоэлектрические материалы механически отвечают на электрическое воздействие. Добавляя или удаляя заряд с поверхности пьезоэлектрического диска или пластины, аудиоплеер может заставить его механически перемещаться и производить звук. Пьезоэлектрические динамики обычно применяют в качестве высокочастотных компонентов в акустических системах и в бесчисленных электронных устройствах, в том числе в часах, мобильных телефонах и смартфонах.



**Рис. 12.2.16.** В динамике звук производится меняющимся электрическим током, приводящим в движение конус из пластика или специальной бумаги. Конус соединяется с катушкой, вставленной в цилиндрический канал, вырезанный в постоянном магните. На ток, идущий через катушку, действует сила Лоренца, в результате чего катушка то втягивается в канал, то выходит из него, в зависимости от направления тока.





## ГЛАВА 13

# ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

---

**Э**лектрические и магнитные поля настолько тесно связаны, что одно может порождать другое даже в вакууме. Фактически два поля могут порождать электромагнитные волны, в которых они бесконечно воссоздают друг друга и распространяются в пространстве с огромной скоростью. Эти электромагнитные волны пронизывают все вокруг, они являются основой для значительной части наших коммуникационных технологий, для передачи тепла посредством излучения, они дают нам возможность видеть Вселенную, в которой мы живем.

В этой главе я постараюсь объяснить общую концепцию электромагнитных волн, сконцентрировавшись на той части спектра, которая включает радиоволны и микроволны. Еще двести лет назад мы не знали о существовании этих волн, но сегодня мы воспринимаем их как нечто само собой разумеющееся. Мы со всех сторон окружены беспроводной связью, спутниковым телевидением и радио, системами глобального позиционирования, а некоторые из нас так и идут по жизни с гарнитурой мобильного телефона в ушах. Даже когда мы используем для некоторых средств связи электрические провода, эти провода тоже испускают поблизости от себя радио- и микроволны. В результате благодаря этим электронным средствам мы живем в мире, где постоянно находимся в контакте со всеми. То есть, разумеется, со всеми, кроме человека, сидящего за столом напротив нас.

Спектр радио- и микроволн ограничен, поэтому общество пытается регулировать его распределение. Везде, где возможно, мы стараемся повторно использовать частоты и каналы, варьируя расстояния, направленность и кабели, чтобы поддерживать разделение сигналов. Но постоянно возрастающая потребность каждый год заставляет нас втискивать все новые устройства в спектр радио- и микроволн. И конца этому не видно.

### 450 13.1 Радио

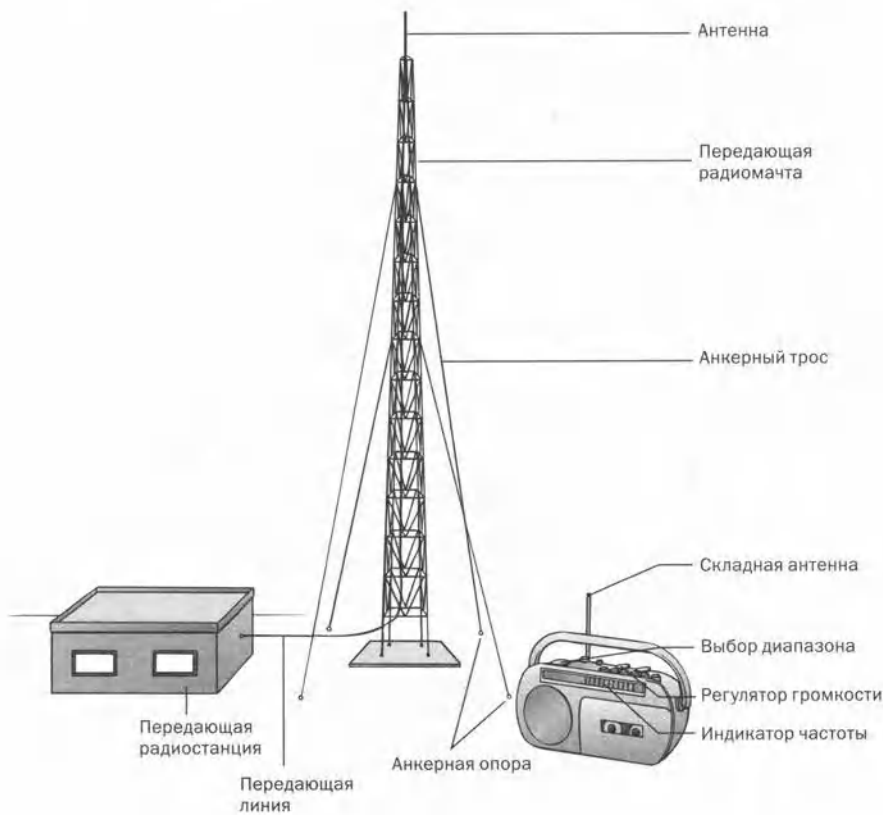
*Как радио передает звуковую информацию через пространство, которое кажется пустым.*

### 458 13.2 Микроволновые печи

*Как микроволновки разогревают пищу благодаря воде, которая в ней содержится.*

### 464 13.3 Телевидение

*Как телевидение передает картинку при помощи радиоволн.*



## 13.1 Радио

Мы уже знаем, что электрический ток может представлять звук и воспроизводить речь и музыку везде, куда протянуты электрические провода. Но как передать звук кому-то, кто сейчас в пути? Нужен какой-то способ представления звука, не требующий проводов. Нам нужно радио! В этой главе описано, как работает радио. Мы рассмотрим, как происходит передача и прием радиоволн. Мы также изучим наиболее распространенные способы передачи звука в виде радиоволн, которые позволяют ему путешествовать в пространстве на очень далекие расстояния.

### Прелюдия к радиоволнам

Прежде чем мы займемся радио и радиоволнами, давайте ненадолго отвлечемся, чтобы завершить введение в электродинамику, которое мы начали в главах 10 и 11. Несмотря на то, что мы уже знаем главное о том, как связаны электричество и магнетизм, один из еще не изученных аспектов этой темы очень важен для дальнейшего понимания. Чтобы освежить вашу память, напомним: электрические поля могут быть образованы электрическими зарядами или изменением магнитных полей, а магнитные поля могут создаваться движущимися электрическими зарядами (таб. 13.1.1).

В 1865 году шотландский физик Джеймс Клерк Максвелл (1831–1879) открыл еще один источник магнитных полей — изменяющиеся во времени электрические поля. Этот эффект едва заметен, поэтому на протяжении большей части XIX века ученые не обращали на него внимания. Лишь когда Максвелл попытался сформулировать общую теорию электромагнетизма, он обнаружил эту дополнительную связь между электричеством и магнетизмом. Это последнее соотношение завершает таблицу 13.1.1. В совокупности эти взаимосвязи позволили Максвеллу понять одно из удивительных природных явлений: электромагнитные волны!

## Третья взаимосвязь между электричеством и магнетизмом

Изменяющиеся во времени электрические поля создают магнитное поле.

Таблица 13.1.1. Источники электрических и магнитных полей

Источники электрических полей	Источники магнитных полей
Электрический заряд	Движущийся электрический заряд
Изменяющиеся магнитные поля	Изменяющиеся электрические поля

Поскольку электрические поля могут порождать магнитные поля и эти последние обладают энергией, становится ясно, что электрические поля тоже должны обладать энергией. Количество энергии в однородном электрическом поле равно квадрату напряженности поля, умноженному на объем и деленному на произведение  $8\pi$  и постоянной Кулона. Мы можем записать это соотношение для энергии электрического поля в следующем виде:

$$\text{энергия} = \frac{(\text{напряженность электр.поля})^2 \times \text{объем}}{8\pi \times \text{постоянная Кулона}} \quad (13.1.1).$$

Завершив нашу прелюдию этим выводом, приступим теперь к выяснению того, как работает радио.

## Антенна и колебательный контур

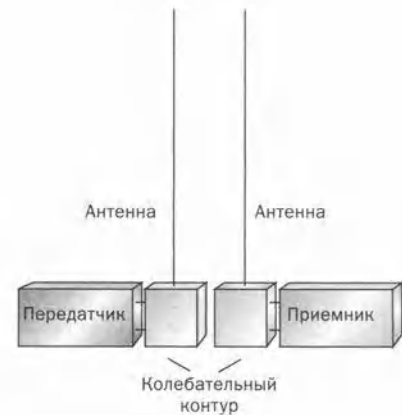
Радиопередатчик сообщается с радиоприемником при помощи радиоволн. Эти волны образуются при движении электрического заряда вверх и вниз по антенне передатчика и улавливаются, когда они толкают электрический заряд вверх и вниз по антенне приемника. Но что же такое радиоволны и каким образом их создает заряд на антенне?

Мы уже знаем, что электрический заряд создает электрическое поле и что движущийся заряд создает магнитное поле. Однако в случае, если заряд ускоряется, происходит кое-что еще. Движущийся с ускорением заряд образует смесь изменяющихся электрических и магнитных полей, которые могут бесконечно воспроизводить друг друга и путешествовать в пространстве на большие расстояния. Эти переплетенные электрические и магнитные поля обычно называют электромагнитными волнами. Когда речь идет о радио, то соответствующие электромагнитные волны с низкой частотой и большой длиной волны называют радиоволнами.

Но прежде чем рассматривать структуру радиоволны и ее перемещение в пространстве, давайте начнем с более простых вещей: рассмотрим, как влияют друг на друга две расположенные рядом металлические антенны. На **рис. 13.1.1** изображены стоящие рядом радиопередатчик и радиоприемник. Благодаря их близости электрический заряд на антенне передатчика, несомненно, влияет на заряд на антенне приемника.

Для связи с соседним приемником передатчик перемещает заряд вверх и вниз по антенне. Электрическое поле заряда распространяется вокруг передающей антенны, захватывая приемную антенну, в которой оно также толкает заряд вверх и вниз. К сожалению, в приемной антенне возникает лишь слабое движение заряда, и приемнику бывает трудно отличить его от случайного теплового движения зарядов или результата воздействия других электрических полей, окружающих приемник. Поэтому передатчик придерживается следующей разумной стратегии — он двигает заряды вверх-вниз по антенне ритмично, с определенной частотой. Так как возникающее ответное движение в приемной антенне также происходит ритмично с той же частотой, то приемнику гораздо проще отличить его от различного рода помех.

Использование ритмичного движения имеет еще одно преимущество: оно позволяет и передатчику, и приемнику использовать колебательный контур — резонансную электронную схему, состоящую из конденсатора и катушки индуктивности (**рис. 13.1.2**). Заряд “плещется” взад-вперед по контуру с определенной частотой, подобно тому как ребенок раскачивается на качелях. И так же как вы



**Рис. 13.1.1.** Электрический заряд, периодически пробегающий по передающей антенне, вызывает аналогичное движение электрического заряда в приемной антенне.

можете сильно раскачать качели на детской площадке, слегка подталкивая их при каждом качании, так и передатчик может усилить колебания заряда в контуре, слегка подталкивая его в каждом цикле. Давая передатчику возможность перемещать вверх и вниз по антенне большее количество заряда, контур значительно усиливает передаваемый сигнал.

Второй колебательный контур, соединенный с приемной антенной, помогает приемнику обнаружить передачу. Слабые ритмические толчки поля от передающей антенны заставляют все большее количество заряда перемещаться по приемной антенне и соединенному с ней колебательному контуру. Если движение заряда только по антенне было бы трудно обнаружить, гораздо больший заряд, движущийся по колебательному контуру, уже не дает ошибиться.

Мы можем понять, как работает колебательный контур, проследив движение заряда между конденсатором и катушкой индуктивности. Давайте представим, что колебательный контур начинается с разделенного заряда на пластинах конденсатора (рис. 13.1.2, а). Так как катушка проводит электрический ток, ток начинает течь от положительно заряженной пластины через катушку индуктивности к отрицательно заряженной пластине. Однако ток через катушку индуктивности должен расти медленно, и по мере того как это происходит, он создает в катушке магнитное поле (рис. 13.1.2, б).

Вскоре разделенный заряд конденсатора исчезает, и вся энергия колебательного контура оказывается сосредоточена в магнитном поле катушки индуктивности (рис. 13.1.2, в). Катушка противодействует изменению тока, поэтому ток продолжает течь. Катушка использует энергию своего магнитного поля, чтобы поддерживать протекание тока, и на конденсаторе вновь появляется разделенный заряд (рис. 13.1.2, г). В какой-то момент магнитное поле катушки уменьшается до нуля, и все возвращается в исходное состояние — но не совсем. Хотя вся энергия колебательного контура вернулась в конденсатор, знаки заряда на его пластинах поменялись местами (рис. 13.1.2, д).

Затем весь этот процесс повторяется в обратном порядке. Ток течет через катушку индуктивности в обратном направлении, намагничивая ее в другую сторону, и контур вскоре возвращается в исходное состояние. Этот цикл, когда заряд перетекает с одной стороны конденсатора на другую и обратно, повторяется снова и снова.

Колебательный контур представляет собой электронный гармонический осциллятор, аналогичный механическим гармоническим осцилляторам, которые мы рассмотрели в главе 9. Как для всех гармонических осцилляторов, период контура (время, за которое совершается один цикл) не зависит от амплитуды колебаний. Таким образом, независимо от того, сколько заряда «плещется» в контуре, время, необходимое для того, чтобы заряд совершил полный оборот, всегда одинаково.

Период колебательного контура зависит только от характеристик его конденсатора и катушки. Чем больше емкость конденсатора, тем больше заряда он может накопить при заданном количестве энергии и тем больше времени требуется, чтобы заряд прошел по контуру в виде тока. Чем больше индуктивность катушки (то есть ее противодействие изменению тока), тем больше времени занимает запуск и остановка тока. Период колебательного контура с конденсатором большой емкости и катушкой большой индуктивности может составлять одну тысячную долю секунды и более, в то время как контур с маленьким конденсатором и катушкой небольшой индуктивности может иметь период в одну миллиардную долю секунды и даже меньше.

Индуктивность определяется как падение напряжения на катушке, деленное на скорость изменения протекающего через катушку тока. Таким образом, единица индуктивности (ее еще называют коэффициентом самоиндукции) равна единице напряжения, деленной на ток, деленный на время. В системе СИ за единицу индуктивности принят генри (сокращенно Гн, или Н). Один генри равен вольт-секунда/ампер. В то время как индуктивность больших электромагнитов может достигать сотен генри, в радиотехнике чаще встречается индуктивность 1 мкГн (0,00001 Гн).

Благодаря резонансным свойствам колебательные контуры очень широко применяются в радиотехнике. Дело в том, что действующие на ток в контуре слабые ритмические толчки могут вызвать очень значительные колебания заряда

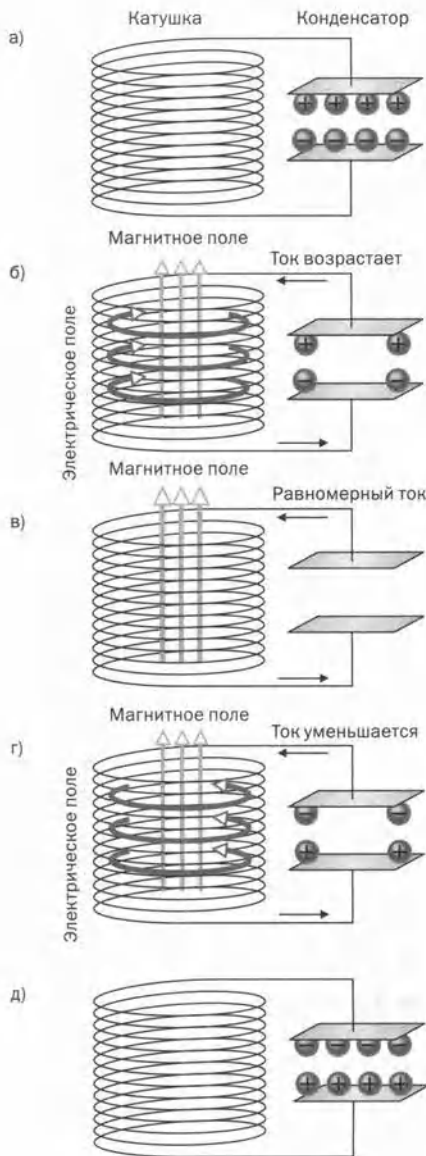


Рис. 13.1.2. Колебательный контур состоит из конденсатора и катушки. Энергия ритмично перемещается от одного компонента к другому и обратно.

в этом контуре. Что касается радио, эти ритмические толчки возникают, когда передатчик начинает пропускать переменный ток через катушку. Под действием полей катушки в близлежащем колебательном контуре ток идет то в одну, то в другую сторону, в результате чего огромное количество заряда перемещается в нем туда и обратно, поднимаясь и опускаясь по передающей антенне. Электрическое поле этого заряда, в свою очередь, ритмично толкает заряд в приемной антенне, в результате чего значительное количество заряда движется по ней вверх-вниз и “плещется” в обе стороны в колебательном контуре приемника (рис. 13.1.3). Приемник может без труда обнаружить этот “плещущийся” заряд.

Энергия передается от передатчика к приемнику посредством резонансно переноса энергии — от передатчика колебательному контуру и антенне передатчика, затем антенне и колебательному контуру приемника и, наконец, самому приемнику. Такая система последовательных передач может эффективно работать только в том случае, когда все части системы имеют одну и ту же резонансную частоту. Настройка радиоприемника на определенную станцию в значительной степени сводится к регулировке конденсатора и катушки таким образом, чтобы колебательный контур был настроен на нужную резонансную частоту.

## Радиоволны

Когда две антенны находятся рядом, заряд в передающей антенне непосредственно действует на заряд в приемной антенне электростатической силой. Но когда антенны далеко друг от друга, взаимодействие между ними имеет более сложный характер. Заряд в передающей антенне в этом случае должен испускать радиоволны, чтобы воздействовать на заряд в приемной антенне. Как и водяная волна, радиоволна является возмущением, которое несет энергию из одного места в другое. Но в отличие от водяных волн, которые распространяются в жидкой среде, радиоволны могут путешествовать в пустоте, от одного конца Вселенной до другого.

Как и все электромагнитные волны, радиоволна состоит только из изменяющихся электрического и магнитного полей. По мере того как волна распространяется в пространстве со скоростью света — а именно  $299\,792\,458$  м/с, — эти поля снова и снова воссоздают друг друга. Радиоволна возникает при ускорении электрического заряда в антенне. В то время как неподвижные заряды или равномерный ток создают неизменные электрические или магнитные поля, ускоряющийся заряд создает поля, которые изменяются во времени. Когда заряд течет по антенне вверх и вниз, его электрическое поле попеременно будет направлено то вверх, то вниз, а его магнитное поле — то влево, то вправо. Эти изменяющиеся поля затем снова и снова воссоздают друг друга и распространяются в пространстве в виде электромагнитной волны.

Волна, излучаемая вертикальной передающей антенной, имеет вертикальную поляризацию, то есть ее электрическое поле поочередно направлено то вверх, то вниз (рис. 13.1.4). Мы отождествляем эти “взлеты” с гребнями, а расстояние между соседними гребнями — это длина волны. Длина радиоволны обычно составляет 1 м и более. Магнитное поле волны перпендикулярно ее электрическому полю и, следовательно, направлено поочередно то влево, то вправо.

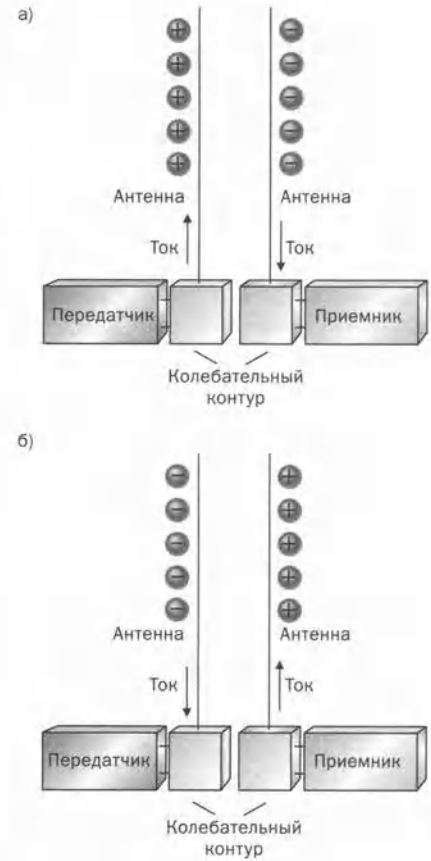
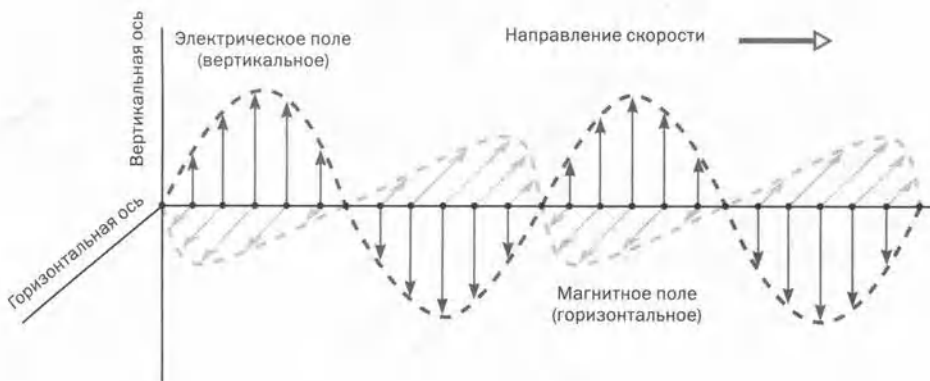
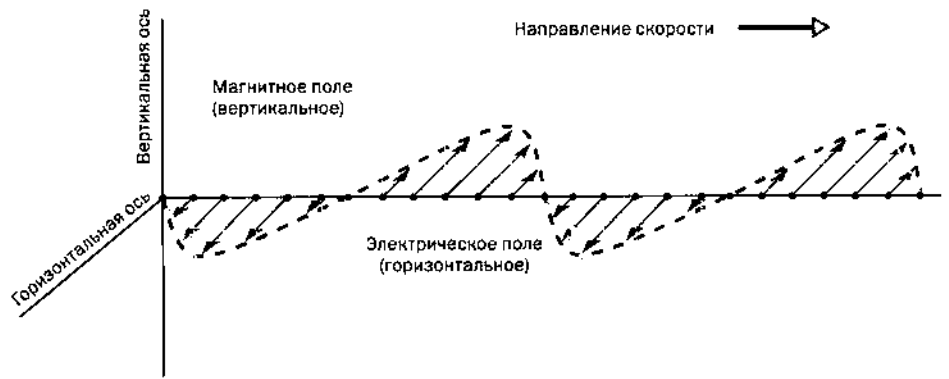


Рис. 13.1.3. (а) Когда ток в передающей антенне течет вверх, он заставляет ток в приемной антенне течь вниз, и наоборот (б).

Рис. 13.1.4. В вертикально поляризованной электромагнитной волне электрическое поле вдоль траектории движения волны поочередно направлено то вверх, то вниз, в то время как магнитное поле — то вправо, то влево. Вертикальные стрелки обозначают величину и направление электрического поля в точке, из которой выходит стрелка, горизонтальные стрелки характеризуют магнитное поле в этой точке. Данная волна движется вправо со скоростью света.

Рис. 13.1.5. В этой горизонтально поляризованной электромагнитной волне электрическое поле вдоль траектории движения волны поочередно направлено то влево, то вправо, в то время как магнитное поле — то вверх, то вниз. Вертикальные стрелки обозначают величину и направление магнитного поля в точке, из которой выходит стрелка, горизонтальные стрелки характеризуют электрическое поле в этой точке. Данная волна движется вправо со скоростью света.



Если бы передающая антенна была наклонена горизонтально, электрическое поле волны было бы направлено по очереди то влево, то вправо и волна имела бы горизонтальную поляризацию (рис. 13.1.5). В этом случае магнитное поле волны было бы направлено то вверх, то вниз. Независимо от поляризации, электрическое и магнитное поля движутся вместе в виде бегущей волны, так что структура полей плавно перемещается в пространстве со скоростью света.

### Распространенное заблуждение:

#### Электромагнитные волны и волнообразное движение

**Заблуждение:** Так как поля электромагнитной волны кажутся волнистыми (рис. 13.1.4 и 13.1.5), сама световая волна также движется волнообразно; двигаясь вправо, она действительно совершает волнообразные движения вверх-вниз или взад-вперед!

**На самом деле:** На рис. 13.1.4 и 13.1.5 стрелки показывают поля электромагнитной волны и относятся к точкам на оси, которая обозначает прямую траекторию волны. Обе волны на этих рисунках распространяются вправо по прямой вдоль оси. Стрелки характеризуют значения полей в точках вдоль этой линии.

Если бы вы стояли на одном месте и наблюдали за прохождением этой волны, то заметили бы, что ее электрическое поле колеблется вверх-вниз с той же частотой, что и породивший это поле заряд. Когда волна проходит мимо находящейся на определенном расстоянии приемной антенны, она с такой же частотой заставляет подниматься и опускаться заряд в антенне. Если принимающий колебательный контур является резонансным на этой частоте, количество “плещущегося” в нем заряда должно стать достаточно большим, чтобы приемник мог его обнаружить.

Радиостанция может оптимизировать передачу при помощи передающей антенны соответствующей длины. Когда эта длина составляет ровно четверть длины передаваемой радиоволны, заряд энергично движется вверх-вниз по антенне благодаря естественному резонансу. Как ни странно, антенна — это еще один пример электронного гармонического осциллятора, период колебаний которого зависит только от его длины. (Фактически антенна является верхней частью колебательного контура; ее острие выступает в качестве одной из пластин конденсатора, а протяженная часть — в качестве верхней части катушки индуктивности. Остальные компоненты в основании антенны завершают колебательный контур.) Когда передающий колебательный контур и антенна имеют одну и ту же резонансную частоту, между ними происходит резонансный перенос энергии. Как вы и ожидали, эти резонансные эффекты помогают производить мощные радиоволны.

Передающая антенна с наибольшей силой испускает радиоволны перпендикулярно своей длине. В этом нет ничего удивительного, потому что движение зарядов в антенне наиболее заметно, если наблюдать его с линии, перпендикулярной к длине антенны. Таким образом, вертикальная антенна посылает большую часть волн в горизонтальном направлении, где мы можем с наибольшей вероятностью их получить. Из концов антенны волны вообще не исходят\*.

Распространяющаяся в пространстве электромагнитная волна, так же как электрические и магнитные поля, обладает энергией. Волна уносит энергию от передатчика. Когда радиостанция рекламирует, что “передает 50 000 ватт музыки”, это

\* Имеется в виду, что радиоволны не излучаются в направлении вдоль антенны. Зато концы антенны участвуют в излучении волн во всех других направлениях. Интенсивность излучения в разных направлениях для описываемой антенны пропорциональна квадрату синуса угла между направлениями антенны и направлением, вдоль которого движется излученная волна.

означает, что ее антенна излучает в виде электромагнитных волн 50 000 Дж энергии в секунду или 50 000 Вт мощности. Чтобы обнаружить волну, приемная антенна должна поглотить достаточную часть этой энергии. Но чем дальше волна уходит от передающей антенны, тем более нечеткой и слабой она становится. Деревья и горы также поглощают или отражают некоторые волны и тем самым ухудшают прием.

Самый лучший прием будет в том случае, когда слушатель находится в зоне сильных радиоволн и на пути от передающей антенны к принимающей нет препятствий. Длина приемной антенны должна составлять четверть длины радиоволны\*, причем приемная антенна должна быть ориентирована вдоль поляризации радиоволны: вертикально — для вертикально поляризованных радиоволн и горизонтально — для горизонтально поляризованных. Ориентация приемной антенны в соответствии с поляризацией волны гарантирует, что электрическое поле волны будет толкать заряд вдоль антенны, а не поперек.

Для обеспечения хорошего приема независимо от ориентации приемной антенны многие радиостанции передают сложную волну круговой поляризации, которая сочетает вертикальную и горизонтальную поляризацию. Чтобы сформировать такую волну, нужно несколько антенн длиной в четверть длины радиоволны. Для волн с длиной меньше нескольких метров эти антенны можно установить на одной мачте. Вот почему коммерческое радио (FM) и телевидение, работающие на коротких волнах, обычно используют круговую поляризацию. Однако радиостанции, работающие на длинных волнах (АМ\*), используют только вертикальную поляризацию.

Поскольку FM-радиоволны обычно включают обе поляризации, их приемные антенны могут быть как вертикальными, так и горизонтальными. Портативные FM-радиоприемники часто используют вертикальные телескопические антенны, в то время как домашние радиоприемники — горизонтальные проволочные антенны. Длина всех этих антенн составляет примерно четверть длины радиоволны.

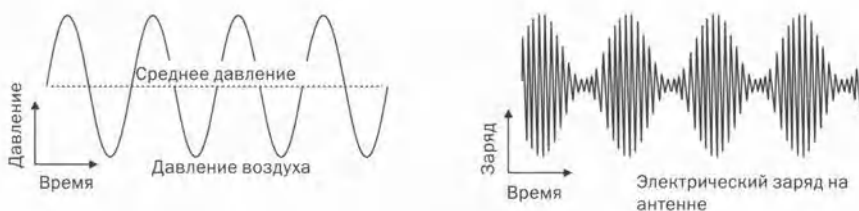
Но для АМ-радио четверть длины волны составит около 100 м, так что прямые АМ-антенны (например, автомобильные) гораздо короче оптимальной длины. Вот почему многие АМ-антенны предназначены для реагирования на горизонтальное магнитное поле радиоволн, а не на их вертикальное электрическое поле. Эти магнитные антенны представляют собой горизонтальные катушки, в которых под действием изменяющегося магнитного поля возникают индукционные токи.

## Представление звука: амплитудная и частотная модуляция

Радиопередатчик не просто испускает радиоволны. Он использует эти радиоволны для представления звука. Поскольку звуковые волны — это колебания плотности воздуха, а радиоволны — колебания электрического и магнитного полей, радиоволна не может непосредственно «нести» звуковую волну. Однако радиоволна может нести звуковую информацию и сообщать приемнику, как именно следует воспроизвести звук.

Для передачи звуковой информации радиостанция изменяет радиоволну, чтобы та представляла сжатия и разрежения воздуха. Затем приемник воссоздает эти сжатия и разрежения. Существуют два метода, посредством которых радиоволны могут представлять эти колебания плотности. Один называется амплитудной модуляцией и включает в себя изменение интенсивности сигнала. Другой называется частотной модуляцией и включает в себя небольшие изменения частоты сигнала.

При амплитудной модуляции (АМ) колебания плотности воздуха представляются колебаниями амплитуды передаваемой волны (рис. 13.1.6). Чтобы представить сжатие воздуха, передатчик усиливает сигнал, так что вверх и вниз по

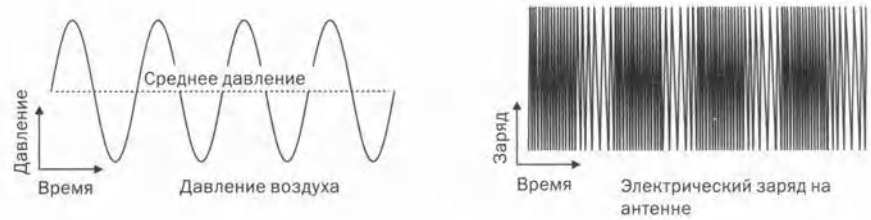


\* Длина антенны приемника, равная четверти длины волны, — это некий идеал, неосуществимый на практике (хотя бы потому, например, что длина волны в диапазоне длинных волн равна нескольким километрам). Этот принцип пытались применить только для передающих антенн, и то на самой заре эры радио.

\* \* Буквы АМ и FM — это аббревиатуры терминов «амплитудная модуляция» (*amplitude modulation*) и «частотная модуляция» (*frequency modulation*). И то и другое — способы кодирования сигнала, они не связаны непосредственно с длиной волны, просто АМ-кодирование применяется в основном для более длинных радиоволн, а FM — для диапазона УКВ, то есть ультракоротких волн. Существуют и другие способы кодирования, например модуляция с одной боковой полосой (ОБП) или амплитудная манипуляция, но они менее распространены. О диапазонах длинных, средних, коротких и ультракоротких волн, их частотах и длине волны — см. с. 456.

Рис. 13.1.6. При передаче звука при помощи амплитудной модуляции давление воздуха представляется интенсивностью радиоволны. Сжатие представляется усилением радиоволны, разрежение — ослаблением.

**Рис. 13.1.7.** При передаче звука при помощи частотной модуляции давление воздуха представляется изменением частоты радиоволны. Сжатие представляется увеличением частоты, разрежение — уменьшением.



передающей антенне движется больше заряда. Чтобы представить разрежение, передатчик ослабляет сигнал, так что по антенне движется меньше заряда.

Частота, с которой заряд движется вверх и вниз по антенне, остается постоянной, изменяется только амплитуда радиоволны. Приемник измеряет амплитуду радиоволн и использует эти измерения для воссоздания звука. При обнаружении сильных радиоволн он толкает мембрану громкоговорителя (динамика) к слушателю и сжимает воздух. Обнаружив слабые радиоволны, приемник оттягивает мембрану динамика от слушателя и разрежает воздух.

При частотной модуляции (ЧМ, или FM) плотность воздуха представляется частотой передаваемой волны (**рис. 13.1.7**). Для представления сжатия воздуха частота передатчика немного увеличивается, так что заряд движется вверх и вниз передающей антенны немного чаще, чем обычно. Чтобы представить разрежение, частота передатчика слегка уменьшается, так что заряд движется вверх и вниз немного реже, чем обычно. Эти изменения частоты очень незначительны — они настолько малы, что заряд продолжает сильно резонировать и прием остается неизменным. Приемник измеряет частоту радиоволн и использует это измерение для воссоздания звука. Обнаружив повышение частоты, он сжимает воздух, а обнаружив снижение — разрежает.

Несмотря на то что амплитудную и частотную модуляцию можно применять для радиоволн любой частоты, наиболее распространенные коммерческие диапазоны частот в Соединенных Штатах — это 550–1600 кГц в AM-диапазоне и 88–108 МГц в FM-диапазоне. Множество других коммерческих, военных и общественных передатчиков, включая телевидение, короткие волны, любительское радио, телефон, полицейскую и авиационную связь, работают на других радиочастотах. Для представления звука и другой информации при помощи радиоволн они используют не только AM и FM, но и некоторые другие методы кодировки сигнала.

## Полоса пропускания и кабельное вещание

Звуковой сигнал, передаваемый по проводу, содержит ряд частот, от нулевой до частоты самого высокого звука, который он представляет. Аналогичным образом звуковой сигнал, передаваемый с радиоволнами, содержит некий диапазон радиочастот, начинающийся несколько ниже официальной частоты радиоволны — так называемой несущей частоты — и заканчивающийся несколько выше этой частоты. Чем шире диапазон частот звука, тем больше звуковой информации может передаваться каждую секунду и тем шире должен быть диапазон радиочастот, необходимых для представления этого звука. Диапазон частот, необходимый для передачи всего потока информации, называется полосой пропускания.

Согласно международному соглашению, AM-радиостанции могут использовать полосу пропускания шириной 10 кГц, то есть по 5 кГц вверх и вниз от ее несущей частоты. Чтобы оставаться в пределах этой полосы пропускания, звуковой сигнал не может содержать частоты выше 5 кГц. Хотя ограниченность частотного диапазона плохо сказывается на качестве передаваемой музыки, но зато это позволяет конкурирующим радиостанциям вещать на несущих частотах, отстоящих одна от другой всего на 10 кГц. Таким образом, в интервале между 550 кГц и 1600 кГц могут работать сразу 106 различных станций.

FM-радиостанция может использовать полосу пропускания 200 кГц, по 100 кГц выше и ниже несущей частоты. Такое щедрое распределение позволяет FM-радио представлять очень широкий спектр звуков, в том числе стереозву-

4 Стерефонические FM-передачи транслируют весьма хитроумным способом — по двум отдельным звуковым каналам, А и Б. Это позволяет стереофоническим приемникам проигрывать оба канала по отдельности, а монофоническим устройствам — совместно, через их единственный динамик. Сначала стереофоническая FM-радиостанция суммирует оба сигнала (А + Б) и использует этот суммарный сигнал для частотной модуляции своей несущей волны. Моно-приемник обнаружит только суммарный сигнал и будет использовать его для воспроизведения звука. Одновременно радиостанция вычитает один сигнал из другого (А – Б) и сдвигает полученный разностный сигнал по частоте вверх на 19 кГц. Кроме того, станция проводит частотную модуляцию своей несущей частоты с помощью этого смещенного разностного сигнала и небольшим количеством пилот-сигнала 19 кГц, который участвовал в сдвиге. Стереофонический радиоприемник обнаруживает и суммарный сигнал, и смещенный разностный сигнал, и пилот-сигнал и использует этот последний, чтобы сдвинуть разностный сигнал обратно на его первоначальную частоту. Затем приемник складывает суммарный и разностный сигналы, при этом получается исходный сигнал А, который приемник отправляет на один из динамиков. Вычитая разностный сигнал из суммарного сигнала, приемник получает исходный сигнал Б и отправляет его на второй динамик.



чение (см. ❶), поэтому FM-радиостанции передают музыку гораздо более качественно, чем AM-станции.

Поскольку высокочастотные радиоволны распространяются по прямым линиям между антеннами, "поймать" FM-станцию на расстоянии более 100 км нелегко. Даже если передающая антенна размещена на вершине высокой башни, из-за кривизны Земли и неровностей земной поверхности радиус приема этих станций все равно ограничен (подробнее об этом см. ❷).

Однако низкочастотные радиоволны (которые используются AM-станциями) отражаются от заряженных частиц, содержащихся в верхних слоях земной атмосферы, поэтому часть радиоволн, которая иначе была бы потеряна в пространстве, вновь возвращается на Землю\*. Это возвращение мощности позволяет ловить передатчики AM-станций на значительных расстояниях, даже если нет прямой связи с антенной передатчика. На закате атмосферные слои начинают настолько эффективно отражать AM-радиоволны, что, находясь за тысячи километров от станции, вы можете слышать передачу так же ясно, как будто станция вещает рядом с вами.

Спектр электромагнитных волн представляет собой ограниченный ресурс, и если бы его можно было использовать только один раз, имеющихся полос пропускания хватило бы ненадолго. К счастью, расстояние и препятствия дают возможность многократного применения одной и той же частоты. Мобильные телефоны, находящиеся далеко друг от друга, могут пользоваться одними и теми же несущими частотами и диапазонами, потому что их радиоволны ослабевают с расстоянием и практически не накладываются друг на друга. Но даже соседние радиопередатчики могут работать на одних и тех же несущих частотах, когда прячут свои электромагнитные волны внутри кабеля.

Кабельное радио, телевидение и кабельные сети передачи данных работают аналогично сетям беспроводного вещания, за исключением того, что в последнем случае электромагнитные волны распространяются по кабелю, а не в пространстве. Обычный радио- или телевизионный кабель состоит из изолированного металлического провода, помещенного внутри оболочки из металлической фольги или оплетки из металлической сетки. Это устройство — провод в трубке — называется коаксиальным (соосным) кабелем, потому что два металлических компонента-проводника имеют одну и ту же ось. В отличие от коаксиального, компьютерный кабель для передачи данных состоит из множества изолированных металлических проводов, которые скручены в несколько пар, и называется кабелем с витой парой.

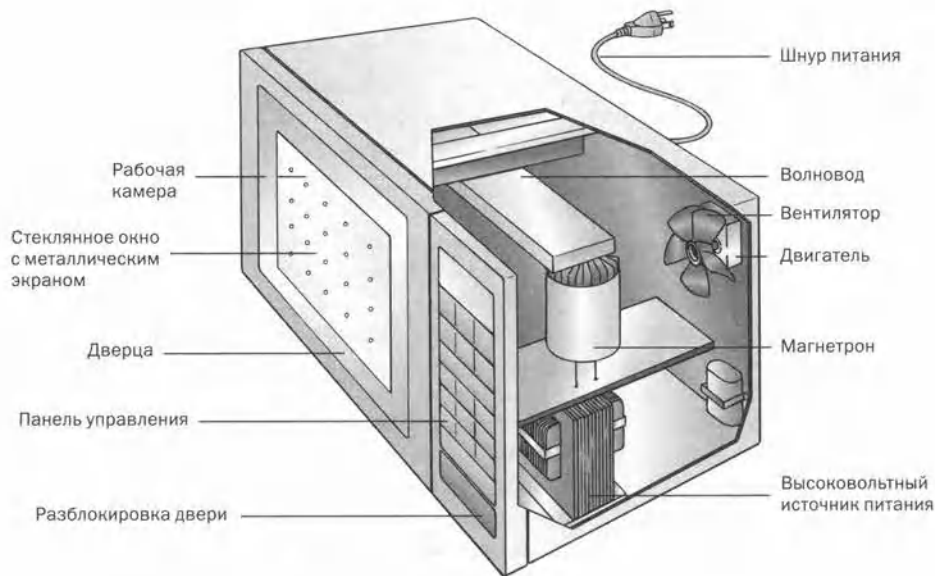
Электромагнитные волны могут легко распространяться по коаксиальному кабелю или кабелю с витой парой, следуя за их изгибами и поворотами на пути от передатчика к приемнику. Из-за того, что в процессе распространения волн участвуют провода, волны становятся более сложными, чем при распространении в пространстве. Тем не менее они так же включают электрические и магнитные поля и так же путешествуют почти со скоростью света.

Поскольку электромагнитные волны в кабеле не взаимодействуют с волнами за его пределами, передатчик и приемник могут использовать любые выбранные ими части спектра, не беспокоясь о распределении частот. Обычный коаксиальный кабель может передавать частоты до 1000 МГц, обычный кабель с витой парой — 350 МГц, так что и тот и другой могут переносить огромное количество информации в секунду.

Тем не менее в последние годы коаксиальным кабелям приходится конкурировать с оптоволоконными кабелями, которые переносят на большие расстояния свет (мы рассмотрим оптические волокна в разделе 15.2.). Как и радиоволны, свет представляет собой электромагнитную волну, и для представления информации его можно модулировать по амплитуде или частоте. Однако частота света чрезвычайно высока; например, частота видимого света составляет  $4,5 \times 10^{14}$ – $7,5 \times 10^{14}$  Гц. Если бы мы могли разместить FM-радиоканалы с интервалом 200 кГц в пределах видимого спектра, у нас был бы выбор из полутора миллиардов каналов!

\* Земля, будучи неплохим проводником, тоже отражает эти волны, поэтому радиоволны, отражаясь то от нее, то от слоя заряженных частиц, могут огибать земную поверхность, подобно свету, отражающемуся от двух параллельных зеркал.

❷ Телевидение, как и FM-радио, использует высокочастотные электромагнитные волны, которые распространяются по прямой и из-за кривизны земной поверхности блокируются горизонтом примерно в 100 км от наземных антенн. Чтобы охватить более широкую аудиторию, инженеры компании *Westinghouse* в конце 1940-х гг. в рамках программы *Stratovision* проводили эксперименты с антеннами, установленными на самолетах. В программе было задействовано четыре самолета *B-29*, с помощью которых ретранслировались телевизионные передачи для более чем 75% населения Соединенных Штатов, в том числе сельских жителей. Несмотря на успех испытательных полетов, программу отменили по политическим причинам, и она так никогда и не была реализована.



## 13.2 Микроволновые печи

Электромагнитные волны не только переносят звук из одного места в другое — они переносят и энергию. Микроволновая печь представляет собой один из интересных примеров подобной передачи энергии. В микроволновке электромагнитные волны довольно высокой частоты передают энергию непосредственно молекулам воды, содержащимся в продуктах, так что пища готовится (или разогревается) изнутри наружу. В этом разделе мы разберемся и в том, как эти волны создаются, и в том, каким же образом они разогревают еду.

### Микроволны и пища

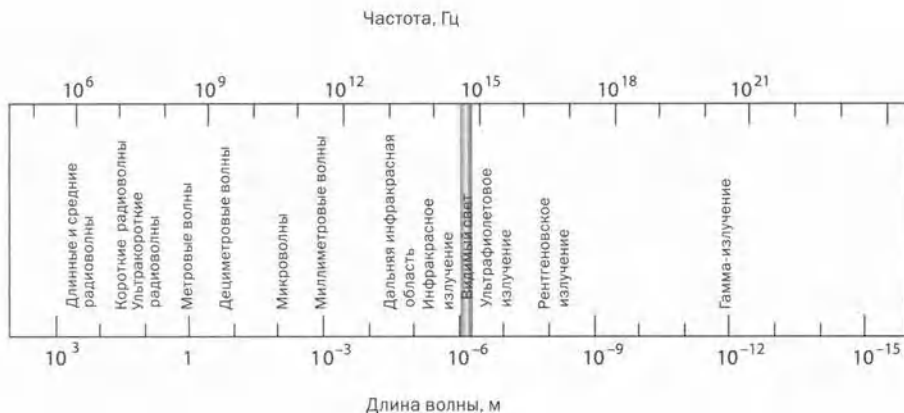
В разделе 7.3, рассматривая лампы накаливания, мы говорили о длине волны электромагнитных волн. Изучая радио, мы концентрировались на частоте электромагнитных волн. Тем не менее из уравнения 9.2.1 (с. 328) нам известно, что длина и частота волны зависят друг от друга: электромагнитная волна в вакууме имеет и длину, и частоту, а произведение этих величин дает скорость волны, то есть скорость света. Это отношение можно записать в следующем виде:

$$\text{скорость света} = \text{длина волны} \times \text{частота волны} \quad (13.2.1)$$

Как и на рис. 7.3.2 (с. 238), на рис. 13.2.1 представлены длины волн некоторых типов электромагнитного излучения, а также соответствующие им частоты. Радиосвязь использует низкочастотную, то есть длинноволновую часть электромагнитного спектра. Обычно различают диапазоны длинных (длина волны 1–10 км), средних (100 м — 1 км), коротких (10–100 м) и ультракоротких (1 см — 10 м) волн. Их частоты расположены соответственно в интервалах 30–300 кГц, 300 кГц — 3 МГц, 3–30 МГц и 30 МГц — 30 ГГц. Волны, имеющие длину более 1 м, называют радиоволнами. В микроволновых печах используют электромагнитные волны с длиной меньше 1 м, их называют микроволнами. Диапазон длин микроволн — от 1 м до 1 мм.

Чтобы понять, как работает микроволновая печь (об изобретении этого устройства см. ❶), начнем с молекул воды. Молекула воды электрически поляризована, то есть на одном ее конце сосредоточен положительный заряд, на другом — отрицательный. Поляризация объясняется с позиций квантовой физики и связана со стремлением атома кислорода оттянуть электроны от атомов водорода. Молекула воды имеет изогнутую форму, с двумя атомами водорода, торчащими по обе стороны атома кислорода, словно уши Микки Мауса. Атом кислорода частично оттягивает электроны от атомов водорода, и его сторона молекулы

❶ Американец Перси Лебарон Спенсер (1894–1970) рано стал сиротой и так и не смог окончить начальную школу. Несмотря на это, он сделал блестящую карьеру ученого, изобретателя микроволновой печи. В 1945 г., во время визита в лабораторию, где испытывались магнетроны, Спенсер наклонился над работающим прибором — и шоколадка в кармане его рубашки тут же растаяла! Сразу же поняв, что произошло, Спенсер вскоре уже жарил на магнетроне попкорн и даже попытался сварить яйцо (оно взорвалось). С тех пор процесс приготовления пищи изменился навсегда.



**Рис. 13.2.1.** Спектр электромагнитного излучения. Микроволны имеют длину от 1 м до 1 мм, что соответствует частотам от 300 МГц до 300 ГГц.

заряжается отрицательно, в то время как сторона атомов водорода становится положительно заряженной. Таким образом, молекула воды полярна.

В кристалле льда эти полярные молекулы воды образуют упорядоченную структуру, со строго определенным положением и ориентацией. Но в жидкой фазе молекулы воды ориентированы более беспорядочно (**рис. 13.2.2**). Их расположение ограничивается только их стремлением образовать связи; положительный конец одной молекулы притягивается к отрицательному концу другой, в результате чего образуется сеть связанных молекул. Эта связь между положительно заряженным атомом водорода одной молекулы воды и отрицательно заряженным атомом кислорода другой называется водородной связью.

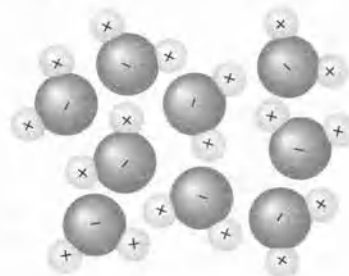
Если вы поместите жидкую воду в сильное электрическое поле, ее молекулы, как правило, начнут разворачиваться в соответствии с направлением поля. Дело в том, что неориентированные молекулы обладают избытком электростатической потенциальной энергии и устремляются в том направлении, где они могут быстро понизить свою потенциальную энергию. В данном случае молекулы воды под действием крутящего момента будут приобретать угловое ускорение, которое заставит их поворачиваться, чтобы сориентироваться в нужном направлении. Поворачиваясь, молекула будет толкать другие молекулы, при этом часть ее электростатической потенциальной энергии будет превращаться в тепловую.

Похожий эффект наблюдается, если в переполненном зале вдруг скомандовать всем присутствующим повернуться налево или направо. Поворачиваясь, люди трутся друг о друга, и трение скольжения преобразует часть своей энергии в тепловую энергию. Если повторить команду повернуться многократно, то людям станет довольно жарко. То же самое относится и к воде. Если электрическое поле меняет свое направление много раз, молекулы воды будут многократно разворачиваться то в одну, то в другую сторону и при этом становиться все горячее.

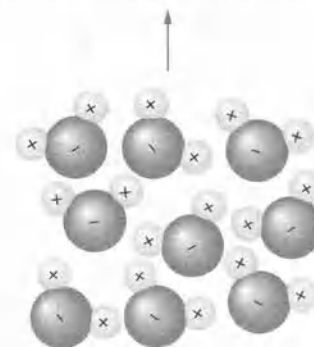
Колеблущееся электрическое поле микроволн прекрасно подходит для нагрева воды. Микроволновая печь использует волны с частотой 2,45 ГГц (2,45 гигагерц, или 2 450 000 000 Гц), чтобы миллиарды раз в секунду поворачивать содержащиеся в пище молекулы воды то в одну, то в другую сторону. Поворачиваясь, молекулы воды сталкиваются друг с другом и нагреваются. Вода поглощает микроволны и преобразует их энергию в тепловую. Данная конкретная частота микроволн была выбрана не из-за резонансного эффекта, а просто потому, что она не используется для связи и, кроме того, способствует равномерному приготовлению еды. При более высокой частоте пища слишком интенсивно поглощала бы микроволны, и они не успевали бы достаточно глубоко проникнуть в крупные продукты. При более низкой же частоте микроволны проходили бы через продукты слишком легко, не давая нужной эффективности обработки.

Это закручивающее действие (так называемый дипольный сдвиг) объясняет, почему в микроволновой печи можно готовить только продукты, содержащие воду или другие полярные молекулы. Керамика, стекло и пластик, из которых делают посуду для микроволновок, не содержат воды и обычно остаются прохладными. Даже лед с трудом поглощает энергию микроволн, потому что его кристаллическая структура ограничивает молекулы воды и не дает им поворачиваться.

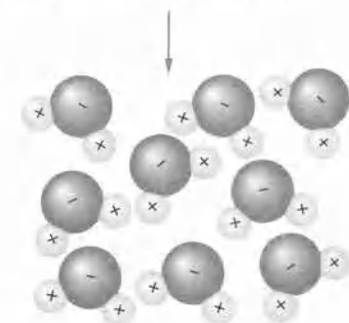
а) Электрическое поле отсутствует



б) Направление электрического поля



в) Направление электрического поля



**Рис. 13.2.2.** (а) В жидкой воде в отсутствие электрического поля молекулы ориентированы беспорядочно. (б, в) Но под действием электрического поля молекулы воды ориентируются своими положительно заряженными частями по направлению поля.

Но если лед в микроволновой печи тает медленно, то образующаяся из него жидкая вода нагревается быстро. Это объясняет, почему так легко ошпариться, когда размораживаешь в микроволновой печи замороженные продукты. Та часть, которая разморозилась первой, поглощает большую часть энергии микроволн и перегревается, в то время как другая часть остается замороженной. Поднося кусок ко рту, вы одновременно рискуете сломать зуб и обжечь небо. Для предотвращения этих опасностей во многих микроволновых печах предусмотрены циклы размораживания, когда микроволновый нагрев периодически прерывается, давая теплу возможность естественным путем проникать в пищу, чтобы растопить лед. После того как все части разморозятся, продукт начинает равномерно поглощать микроволны.

## Металл в микроволновой печи

Вопреки распространенному мнению, металлическая посуда и микроволновка вовсе не всегда несовместимы. Собственно говоря, стенки рабочей камеры микроволновой печи изготовлены из металла, тем не менее никаких проблем с ними не возникает. Как и большинство металлических поверхностей, стенки отражают микроволны. При этом стенки выступают в качестве как приемной, так и передающей антенн. Электрические поля микроволн придают ускорение подвижным зарядам в металле и заставляют их поглощать исходные микроволны. Но при ускорении заряды сами испускают новые, вторичные микроволны. Вторичные микроволны имеют такую же частоту, что и исходные, но они распространяются в других направлениях. Таким образом, происходит отражение исходных микроволн от металлических поверхностей.

Стенки варочной камеры отражают микроволны и не дают им вырваться. Даже металлическая сетка, покрывающая стеклянное окно, отражает микроволны. Дело в том, что в течение периода микроволны заряду хватает времени на то, чтобы обогнуть каждое отверстие в сетке и тем самым скомпенсировать ее поле. До тех пор пока длина электромагнитной волны намного больше, чем отверстия в металлической сетке, волна очень хорошо отражается от этой сетки. Собственно говоря, если в печь не помещен какой-то полуфабрикат, способный поглощать микроволны, они будут метаться внутри камеры, отражаясь от стен, пока не возвратятся к своему источнику — вакуумной лампе, которая называется магнетроном (рис. 13.2.3), и в конце концов перегреют ее.

В то время как металлические поверхности помогают удерживать микроволны внутри печи, разогревая пищу, а не вас, дополнительный металл в варочной камере может привести к беде. Если вы завернете продукты в алюминиевую фольгу, фольга просто отразит микроволны и пища не приготовится. Тем не менее еда в неглубокой металлической посуде готовится достаточно хорошо, потому что микроволны входят через открытый верх, проходят через пищу, отражаются от посуды и снова проходят через пищу.

Иногда подвижные заряды в металле не только отражают микроволны. Если достаточное количество заряда попадает на острый конец металлической проволоки или кусочка алюминиевой фольги, часть этих зарядов срывается в воздух в виде искр. Такая искра может вызвать пожар, особенно когда металлический предмет контактирует с чем-то легковоспламеняющимся, вроде пластикового или бумажного пакета. Отсюда простое правило: никогда не кладите в микроволновку металлические предметы с углами или остриями!

Некоторые металлические предметы в микроволновой печи нагреваются. Когда микроволны приводят заряды в металле в периодическое движение, в нем возникает переменный ток. Если металл обладает значительным электрическим сопротивлением, то переменный ток при протекании будет нагревать металл. И если толстые стенки печи и посуда имеют низкое сопротивление и остаются прохладными, тонкие полоски металла быстро перегреваются. Особенно восприимчивы к действию микроволн и подвержены порче металлические украшения на фарфоровой посуде, так что попытка подогреть кофе в бабушкиной чашке с золотым ободком наверняка обернется катастрофой. Если ставите в микроволновую печь металл, убедитесь, что он достаточно толстый, чтобы хорошо проводить электричество, и не имеет острых концов.



Рис. 13.2.3. В центре рисунка, слева от охлаждающего вентилятора, расположен магнетрон — источник микроволн для этой печи. Микроволны попадают в рабочую камеру по металлическому волноводу в верхней части печи. Источником питания для магнетрона служит высоковольтный трансформатор (внизу справа).

Такой резистивный нагрев в проводящих предметах иногда может быть даже полезен. Поскольку микроволновые печи готовят пищу одновременно внутри и снаружи, поверхность никогда не становится особенно горячей и блюдо не покрывается золотисто-коричневой хрустящей корочкой. Для улучшения текстуры и внешнего вида блюд некоторые полуфабрикаты продают в комплекте со специальными обертками, которые проводят ток как раз в достаточной степени, чтобы сильно разогреться в микроволновой печи. Эти обертки обеспечивают высокую температуру поверхности, нужную для того, чтобы поверхность блюда стала поджаристой.

Еще одна особенность микроволновых печей состоит в том, что они не всегда готовят равномерно. Объясняется это неравномерностью амплитуды электрического поля микроволн внутри рабочей камеры. Отражаясь от стен и пересекая камеру много раз, несколько микроволн, движущихся в разных направлениях, могут столкнуться в одном и том же месте. Когда это происходит, проявляются эффекты интерференции (см. раздел 9.3). В одном месте направление нескольких электрических полей может совпадать, что приведет к усиливающей интерференции, так что пища там быстро нагреется. Но в другом месте поля могут быть направлены в противоположные стороны, в результате чего будет иметь место гасящая интерференция, так что еда в этом месте останется полусырой.

Если в микроволновой печи не происходит никакого движения, конфигурация микроволн внутри камеры тоже не меняется. Следовательно, есть области, в которых электрическое поле имеет очень большую амплитуду, и области, в которых амплитуда очень мала. Чем больше амплитуда электрического поля, тем быстрее происходит приготовление пищи.

Таким образом, для равномерного разогрева пища в микроволновой печи во время обработки должна двигаться. Поэтому во многих печах имеются вращающиеся подставки, которые автоматически поворачивают полуфабрикат. Другое решение проблемы — менять характер микроволн внутри камеры при помощи вращающегося металлического рассеивателя. При рассеянии меняются параметры волн и пища готовится более равномерно. Существует еще один тип микроволновок: печи, которые используют микроволны двух разных частот. Поскольку микроволны разных частот действуют независимо друг от друга, то маловероятно, что обе волны “пропустят” один и тот же участок.

## Магнетрон: создание микроволн

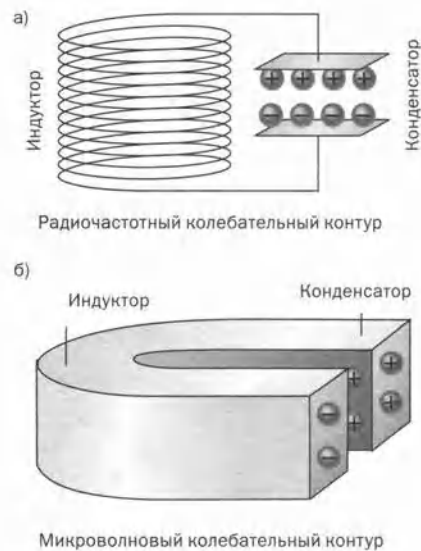
Мы уже понимаем, что “пляшущие” внутри камеры микроволны образуют изменяющиеся электрические поля, которые и готовят пищу в микроволновке. Но откуда берутся эти микроволны? Вспоминая предыдущий рассказ о радио, вы можете предположить, что печь создает переменный ток частотой 2,45 ГГц и что этот ток заставляет заряд “плескаться” по колебательному контуру и двигаться вверх и вниз по антенне... И это в самом деле похоже на то, что происходит в магнетроне!

Магнетрон представляет собой разновидность вакуумной трубки и состоит в основном из металлических и керамических компонентов. Это полая камера, из которой удален весь воздух. Магнетрон использует пучки электронов, чтобы заставить заряд “плескаться” в нескольких колебательных контурах микроволновой печи. Резонансная частота этих контуров совпадает с рабочей частотой печи — 2,45 ГГц. При помощи крошечных антенн магнетрон испускает микроволны, которые готовят пищу.

Резонаторы магнетрона образуют кольцевую колебательную систему, около них происходит взаимодействие пучка электронов и электромагнитной волны.

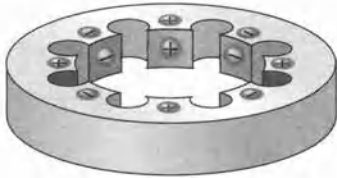
Микроволновые колебательные контуры образуют кольцо вокруг вакуумной камеры магнетрона. Чтобы каждый контур проявлял естественный резонанс на частоте 2,45 ГГц, его конденсатор должен иметь очень малую емкость, а индуктор — очень малую индуктивность. Этим требованиям отвечает С-образный металлический брусок (рис. 13.2.4). Его изогнутая часть служит индуктором, концы — конденсатором.

Электрический заряд плещется взад и вперед по С-образной детали так же, как это происходит в обычном колебательном контуре (рис. 13.1.2). Это устройство называется объемным резонатором и является электронным гармоническим осциллятором, поэтому его период не зависит от величины заряда.



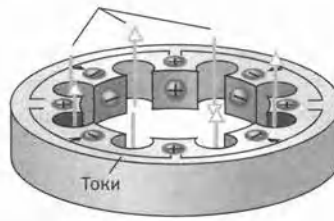
**Рис. 13.2.4.** (а) В радиочастотном колебательном контуре индуктором служит катушка, а конденсатором — пара разделенных пластин. (б) В микроволновом (СВЧ) контуре в качестве индуктора используется изогнутый С-образный металлический брусок, концы которого служат конденсатором.

а)

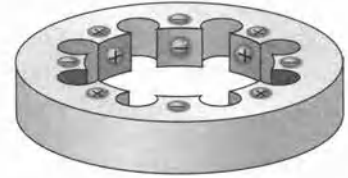


Магнитные поля

б)



в)



Резонаторы магнетрона

**Рис. 13.2.5** В обычном магнетроне имеется восемь С-образных объемных резонаторов, соединенных в кольцо. (а) Разделенный заряд на концах резонаторов (б) течет по кольцу в виде тока, и в какой-то момент заряды меняются местами (в). По мере протекания тока в нишах объемных резонаторов возникают магнитные поля, направленные поочередно то вверх, то вниз.

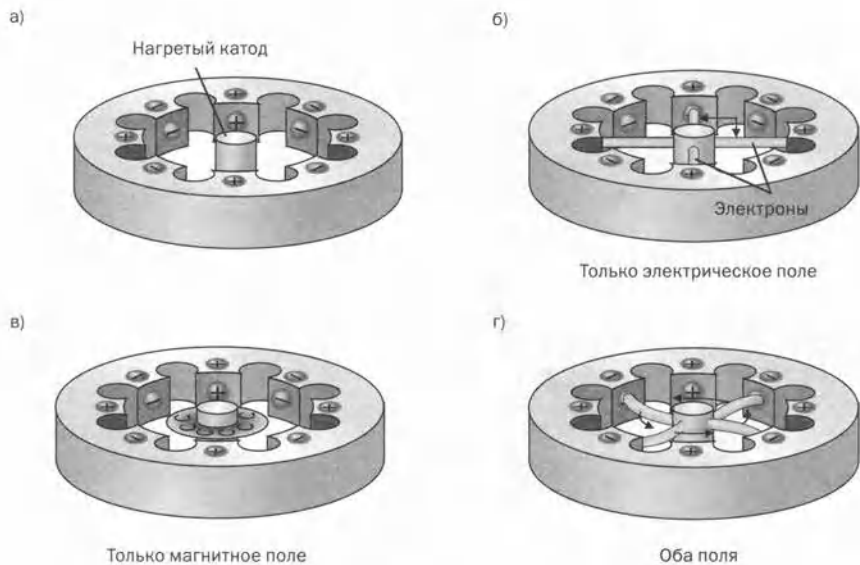
В магнетроне микроволновой печи, как правило, имеется восемь таких резонаторов, тщательно подогнанных по размеру и форме таким образом, чтобы естественный резонанс каждого возникал точно на частоте 2,45 ГГц. Они составлены в кольцо, в котором каждый С-образный резонатор имеет общие концы с двумя соседними, так что они работают поочередно (**рис. 13.2.5**). В начале колебательного цикла половина металлических выступов — общих концов соседних резонаторов, образующих боковую поверхность кольца, — заряжена положительно, а половина — отрицательно (**рис. 13.2.5, а**). Когда по кольцу начинает течь ток, в полостях резонаторов образуются магнитные поля (**рис. 13.2.5, б**). Эти магнитные поля способствуют протеканию тока по кольцу даже после того, как разделение зарядов исчезает. Вскоре разделение зарядов возникает вновь, но распределение положительно и отрицательно заряженных выступов по сравнению с первоначальным меняется на противоположное (**рис. 13.2.5, в**).

Эти токи циркулируют взад и вперед вокруг полостей с частотой 2,45 ГГц, наполняя магнетрон переменными электрическими и магнитными полями. Но по мере того как энергия этих полей тратится на приготовление пищи или теряется из-за несовершенной проводимости полостей, нужно ее постоянно восполнять. Подпитывающая энергия подается в полости в виде четырех потоков высокоэнергетических, так называемых быстрых, электронов.

В центре магнетрона, в вакууме, расположен катод с электрическим подогревом, который способен испускать электроны (**рис. 13.2.6, а**). Высоковольтный источник питания подает на катод отрицательный заряд, так что сильное электрическое поле оказывается направлено от положительно заряженных выступов резонатора к отрицательному заряду на катоде. Если бы в магнетроне имелся только нагретый катод, то испускаемые им электроны в виде четырех пучков устремлялись бы к положительно заряженным выступам (**рис. 13.2.6, б**).

Однако в магнетроне есть еще и большой постоянный магнит. Иначе отчего бы он назывался магнетроном? Этот магнит создает сильное постоянное магнитное поле, которое направлено вверх вдоль оси магнетрона, параллельно катоду (**рис. 13.2.6, в**). Если бы внутри магнетрона не было никаких других полей, то электроны испытывали бы только силы Лоренца, действующие перпендикулярно их скорости, и вращались бы вокруг линий магнитной индукции против часовой стрелки — поведение, известное как циклотронное движение. Вращающиеся электроны оставались бы около катода и никогда не попадали бы в полости резонаторов.

Однако в реальном магнетроне одновременно присутствуют и электрическое (**рис. 13.2.6, б**), и магнитное поля (**рис. 13.2.6, в**). Поскольку оба этих поля влияют на движение электронов, траектория движения электронов становится чрезвычайно сложной (**рис. 13.2.6, г**). Продольное и круговые движения складываются, и четыре потока электронов, изгибаясь, вращаются против часовой стрелки, как спицы крутящегося колеса велосипеда. В результате электронный поток попадает не на положительно заряженный выступ резонатора, как это было бы в отсутствие магнитного



**Рис. 13.2.6.** (а) Горячий катод в центре кольца резонаторов магнетрона испускает электроны. (б) Сами по себе электрические поля направляли бы электроны к положительно заряженным выступам резонаторов. (в) Само по себе магнитное поле (направлено вверх) заставляло бы электроны вращаться вокруг катода, описывая круги против часовой стрелки. (г) Совместно эти поля создают электронные потоки, похожие на изогнутые спицы игибающие катод против часовой стрелки. Эти потоки всегда попадают на отрицательно заряженные концы резонаторов.

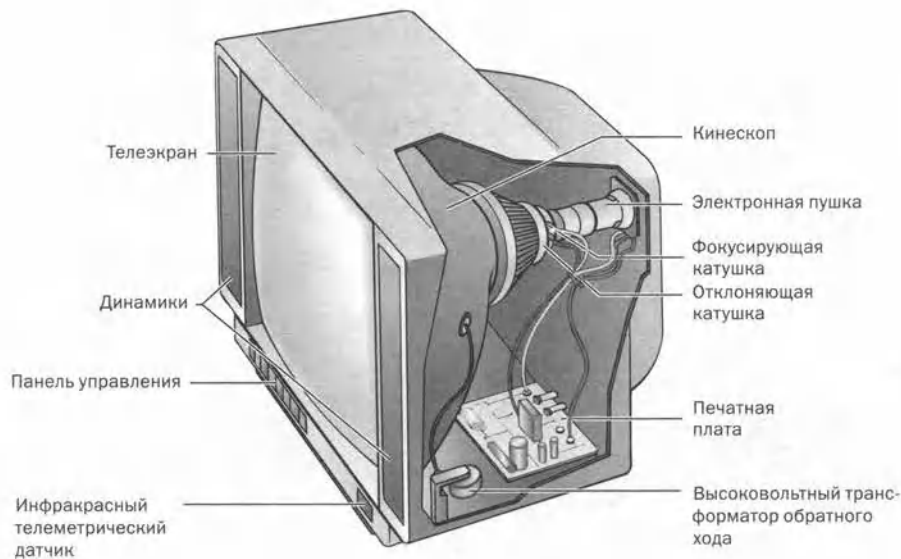
поля, а на его отрицательно заряженный выступ. То есть электронные потоки фактически увеличивают разделенный заряд в полостях объемного резонатора!

Электронные потоки огибают катод в идеальной синхронизации с колебаниями заряда в резонаторах. Поток электронов летит от одного выступа до следующего ровно столько времени, сколько требуется для изменения зарядов на выступах на противоположные. В результате поток всегда попадает на отрицательно заряженный выступ. Увеличивая разделенный заряд, электронные потоки увеличивают энергию колебаний в резонаторе, поддерживают эти колебания и тем самым помогают им передавать энергию пище. Электронные потоки фактически инициируют колебания в резонаторах, передавая энергию очень слабым случайным колебаниям, которые всегда присутствуют в электрических системах.

Но каким образом колебания заряда внутри магнетрона создают микроволны внутри рабочей камеры печи? Существует много способов извлечения микроволн из объемного резонатора. Один из них следующий: в один из резонаторов магнетрона помещают одновитковую катушку. При изменении магнитного поля в этом резонаторе оно индуцирует в катушке переменный ток с частотой 2,45 ГГц. Один конец катушки присоединен к кольцевой конструкции, а другой конец выходит из магнетрона через изолированное герметичное отверстие и соединяется антенной длиной в одну четверть волны. Трехсантиметровая антенна излучает микроволны в металлическую трубку, прикрепленную к стенке рабочей камеры печи. Эти микроволны отражаются от стенок трубки-волновода и попадают в рабочую камеру, где готовится еда.

В современных микроволновых печах применяют высоковольтные источники питания двух типов. Более старый вариант напоминает обычный блок питания (с. 420): он присоединяет первичную обмотку тяжелого повышающего трансформатора с частотой 50 Гц непосредственно к электрической розетке и использует диоды и конденсатор для получения импульсного постоянного тока высокого напряжения с частотой 50 Гц.

Новые "инверторные" источники напоминают импульсные блоки питания (с. 432); они возбуждают собственный переменный ток высокой частоты и используют небольшие высокочастотные повышающие трансформаторы, диоды и конденсаторы для получения высокочастотного импульсного постоянного тока высокого напряжения. Магнетрон микроволновки производит короткий, но интенсивный микроволновый импульс в ответ на каждый импульс постоянного тока высокого напряжения, и под воздействием этих микроволновых импульсов готовится пища.



## 13.3 Телевидение

Когда-то давным-давно слова “вечерние развлечения” означали поход в кино, на бейсбол или на концерт. Но потом развлечения пришли к нам домой и обосновались в наших гостиных и кабинетах. С той поры наша жизнь изменилась навсегда. И хотя мы периодически жалуемся на одиночество и недостаток общения, к которым привела наша новая привычка развлекаться дома, трудно не восхититься достижениями науки и техники, на которых основано это развлечение.

Телевизионные технологии меняются настолько быстро, что за ними не поспеть, поэтому описать физику телевидения — непростая задача. Новые стандарты и принципиально иные технологические решения то и дело врываются на рынок. Наше обсуждение можно рассматривать в лучшем случае как эскизный набросок сегодняшней ситуации, который, скорее всего, через десять безнадежно устареет. Я решил включить раздел о телевизорах в главу об электромагнитных волнах, но мог бы с таким же успехом поместить его в любом другом месте в последней части книги.

### ВНИМАНИЕ!

В телевизоре имеется опасное высокое напряжение, причем даже после того, как он выключен из сети. Для создания изображения телевизор использует потоки высокоэнергетических электронов, поэтому ему необходимо высокое напряжение. Чтобы избежать поражения электрическим током, никогда не открывайте работающий телевизор. Однако даже отключение от сети не делает телевизор безопасным. Поскольку телевизор хранит раздельный электрический заряд в конденсаторах высоковольтного блока питания, в течение нескольких минут после выключения в устройстве может сохраняться высокое напряжение. Не открывайте и не разбирайте телевизор, пока не убедитесь, что в конденсаторах больше не содержится накопленной электрической энергии.

### Начнем с начала: аналоговое телевидение

Одна из наиболее впечатляющих особенностей происходящей сегодня в телевидении цифровой революции состоит в том, что эта революция опирается на сложную, хорошо развитую инфраструктуру аналогового телевидения. Этим двум системам, хотя и не вполне совместимым друг с другом, придется еще достаточно долго сосуществовать, пока телевидение окончательно не станет цифровым. Более того, этот переход выполняется благодаря нескольким серьезным долгосрочным компромиссам. Хотя аналоговые телевизоры не могут непосредственно декодировать полученную цифровую информацию, они продолжают работать в течение переходного периода. Существуют приставки-конвертеры, которые принимают цифровой сигнал, преобразуют его и передают в телевизоры в аналоговом формате. Такой комбинированный метод хотя и не обеспечивает полного качества цифрового видео, однако “картинка” оказывается все же значительно лучше, чем у обычного аналогового устройства.

Похожая процедура, своего рода “операция на открытом сердце”, уже имела место в истории телевидения — в середине 1950-х годов, когда к черно-белым телевизорам присоединились цветные. Собственно говоря, изучение этой революции и основ аналогового телевидения поможет нам понять, каким будет переход на цифровое вещание.



Рассказ о телевидении я начну с объяснения того, как работает обычный аналоговый телевизор — тот самый, основой которого служит устройство под названием кинескоп. Если у вас дома есть громоздкий и тяжелый телевизор с толстым стеклянным экраном, то, скорее всего, это телевизор с кинескопом. После того как мы разберемся, как работает аналоговое телевидение (на примере кинескопа), передо мной откроются два пути: рассказать вам о более современных видеокранах (жидкокристаллических, светодиодных и плазменных), либо о цифровом телевидении. Я выбираю второе: поскольку все, о чем я пишу в этой главе, в любом случае устареет раньше, чем высохнут чернила, я выбираю то, что все же устареет не так быстро.

## Создание телевизионной картинки

В обычном аналоговом телевидении изображение составляется из множества крошечных светящихся точек, образующих на экране прямоугольную структуру. Количество точек определяется телевизионным стандартом, принятым в данной стране. Ниже я буду рассматривать только стандарт NTSC (*National Television Systems Committee*, Национальный комитет по телевизионным стандартам) — стандарт аналогового цветного телевидения, который используется в США. Согласно этому стандарту, число этих точек — 525 по высоте и около 440 по ширине. Другие аналоговые телевизионные стандарты отличаются от NTSC в деталях, но не концептуально.

Несмотря на то что обычный аналоговый NTSC-телевизор включает точки по очереди, одну за другой, он делает это так быстро, что кажется, будто все они освещаются одновременно. Ваши глаза медленно реагируют на изменения света, поэтому вы воспринимаете узор из точек на экране в виде цельного изображения, телевизионной картинке. Создание картинке начинается в верхнем левом углу экрана. Телевизор проходит по точкам по горизонтали слева направо. Промежуток между началом следующей горизонтальной строчки составляет  $1/15750$ -ю секунды. Поскольку на экране 525 горизонтальных линий, телевизор завершает всю картинку за  $1/30$  секунды.

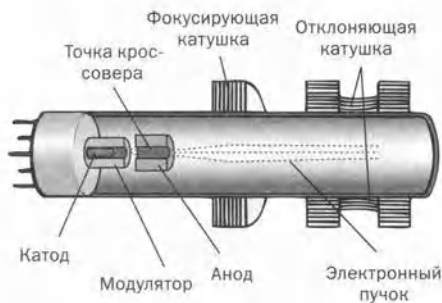
На самом деле, если бы телевизор совершал путь от верхней части экрана к нижней за  $1/30$  секунды, мы замечали бы некоторое мерцание. Для уменьшения мерцания телевизор строит изображение в два прохода сверху вниз: во время первого прохода он освещает нечетные строки, во время второго — четные. Таким образом, каждый из двух проходов по экрану совершается один раз в  $1/60$  секунды, благодаря чему мы практически не видим мерцания.

## Черно-белые кинескопы

Светящиеся точки света образуются на внутренней поверхности стеклянного кинескопа при столкновении электронов с люминофором — веществом, содержащим фосфор и излучающим свет, когда ему передается энергия (рис. 13.3.1). Нагретая поверхность в горловине кинескопа испускает электроны, которые с ускорением движутся к положительному заряду на покрытом фосфором экране. При столкновении с люминофором электроны передают ему энергию, и фосфор начинает ярко светиться.



Рис. 13.3.1. Основные компоненты черно-белого кинескопа. Электроны движутся слева направо и освещают экран.



**Рис. 13.3.2.** На схеме горловины кинескопа показано, как электронный пучок фокусируется вначале внутри анода, а затем еще раз на экране.



**Рис. 13.3.3.** Два из трех источников электронов в цветном кинескопе. У каждого источника имеется собственный катод, модулятор и анод, и каждый источник отвечает за освещение одного из цветных люминофоров.

На электроны, летящие в вакууме внутри кинескопа, действует несколько сил. Эти силы, во-первых, фокусируют электроны в узкий пучок и, во-вторых, отклоняют электронный луч, направляя его в различные точки экрана. Фокусировка и отклонение выполняются электрическими компонентами в горловине кинескопа, которые изображены на **рис. 13.3.2** и **13.3.3**. Пока что ограничимся рассмотрением черно-белого кинескопа.

Электроны выходят из горячего катода — устройства, которое использует тепловую энергию для испускания электронов непосредственно в вакуум. Катод нагревается от расположенной рядом нити, что занимает всего несколько секунд при включении телевизора. Перегорание или другая неисправность нити означают смерть кинескопа.

Катод окружен полым отрицательно заряженным модулятором. Так как модулятор отталкивает электроны, большая часть покидающих катод электронов возвращается к его поверхности. Однако в модуляторе имеется небольшое отверстие, через которое часть электронов может вылететь. Вылетев из отверстия модулятора, электроны притягиваются положительно заряженным анодом и приобретают ускорение.

Форма электрического поля между цилиндрическим катодом, модулятором и полым анодом необычным образом влияет на электроны: поле направляет их в одну небольшую точку внутри анода. Независимо от того, каково было направление движения электронов, когда они покидали поверхность катода, все они движутся к одной и той же точке внутри анода, так называемой точке крестовера — точке минимального сечения электронного пучка.

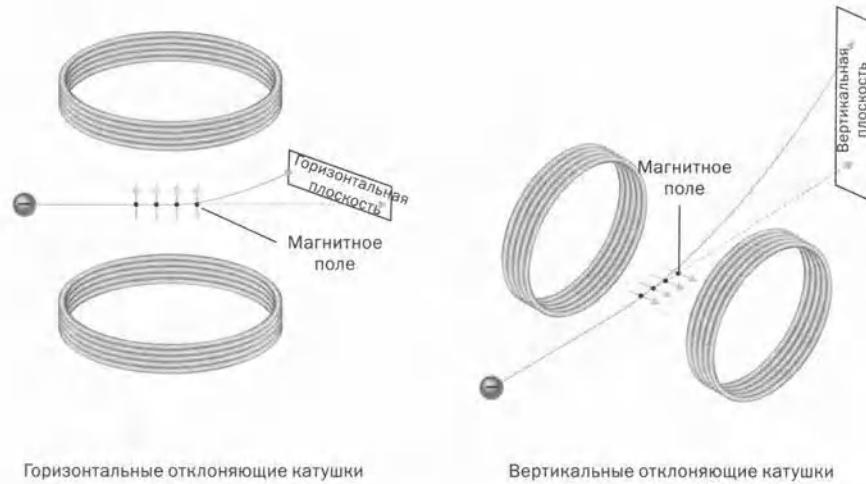
Но электроны не останавливаются в точке крестовера. Они пролетают сквозь анод и продолжают свое движение в сторону экрана. Миновав точку крестовера, электроны расходятся в разные стороны. Их нужно вновь соединить, чтобы все они попали в одну и ту же точку на экране. Вторую фокусировку выполняет сила Лоренца, с которой магнитное поле действует на электроны.

Фокусирующее магнитное поле создает проволоочная катушка, которая окружает горловину кинескопа. Это поле направлено непосредственно в сторону экрана. Поскольку скорости электронов также направлены в сторону экрана, действующие на них силы Лоренца невелики (напомним, что сила Лоренца возникает в том случае, если заряд движется перпендикулярно магнитному полю; эта сила равна нулю, если заряд движется параллельно полю). Но если мы посмотрим на экран через горловину кинескопа (**рис. 13.3.4**), то увидим, что электроны имеют небольшие радиальные составляющие скорости, в результате чего они отклоняются в стороны от лежащей на оси трубки точки крестовера, которую только что миновали. Радиальные составляющие скорости перпендикулярны магнитному полю, поэтому на электроны действует сила Лоренца.

Поскольку эта сила толкает каждый летящий через магнитное поле электрон вправо, то электроны приобретают указывающее вправо ускорение и движутся по спирали. Если смотреть через горловину кинескопа, то движение электрона будет казаться круговым; на самом деле это циклотронное движение, с которым



**Рис. 13.3.4.** По мере того как расходящиеся электроны летят по горловине кинескопа к экрану, фокусирующее магнитное поле придает им ускорение вправо. Электроны двигаются по спирали и вновь сходятся вместе в точке столкновения с экраном.



**Рис. 13.3.5.** Горизонтальные отклоняющие катушки расположены выше и ниже горловины кинескопа. Вертикально направленное магнитное поле, которое они производят, отклоняет электронный луч влево или вправо.

**Рис. 13.3.6.** Вертикальные отклоняющие катушки расположены справа и слева от горловины кинескопа. Горизонтально направленное магнитное поле, которое они производят, отклоняет электронный луч вверх или вниз.

мы уже имели дело на с. 463. Примечательно, что время, за которое каждый электрон совершает полный круг циклотронного движения, не зависит от диаметра этого круга. Поскольку при движении от точки кроссовера до экрана все электроны совершают один полный оборот, все они сходятся на экране в одной и той же точке!

Для того чтобы направить электронные пучки в различные части экрана, телевизор также использует магнитные поля и силы Лоренца. Парные катушки, установленные выше и ниже горловины кинескопа, производят вертикальное магнитное поле, которое смещает электронный пучок по горизонтали (рис. 13.3.5). Регулируя токи в этих горизонтально отклоняющих катушках, телевизор может контролировать горизонтальное положение пятна на экране. Вторая пара катушек, установленная слева и справа от горловины кинескопа, образует горизонтальное магнитное поле, которое смещает пучок электронов по вертикали (рис. 13.3.6). Токи в вертикально отклоняющих катушках регулируют положение пятна от луча по вертикали.

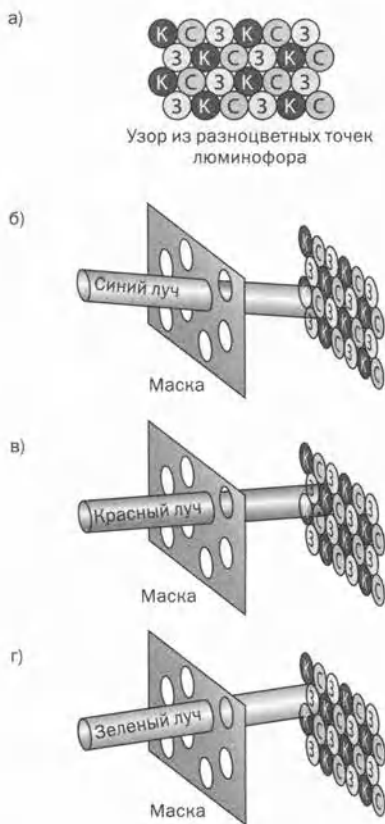
Электронный луч, сталкиваясь с люминофорным покрытием на внутренней стороне экрана, передает люминофору энергию, в результате чего покрытие начинает излучать белый свет. Создание яркого изображения требует большого количества энергии, поэтому пучок электронов на пути к экрану ускоряют. Источник высокого напряжения (15 000–25 000 В) создает на внутренней поверхности экрана и прилегающем ускоряющем аноде положительный заряд, который притягивает электроны. К моменту столкновения с экраном электроны обладают достаточным количеством кинетической энергии, чтобы вызвать ярко-белое свечение люминофора.

Но телевизионное изображение — это не один только белый цвет. Для получения серого или черного пятна телевизор уменьшает поток электронов в луче. Он регулирует этот поток, изменяя заряд модулятора кинескопа. Чем больше отрицательных зарядов на модуляторе, тем труднее электронам перейти от катода к аноду и тем меньше электронов достигает люминофора. Телевизор тщательно регулирует заряд модулятора. Электронный луч скользит взад-вперед по экрану и таким образом, точка за точкой, рисует полную телевизионную картинку.

## Цветные кинескопы

Принцип действия цветных кинескопов почти такой же, как черно-белых, за исключением того, что в них используются три электронных луча и различные люминофоры, которые испускают соответственно красный, синий и зеленый свет. Как мы убедимся в следующей главе, сочетание красного, зеленого и синего позволяет получить любой цвет и оттенок. Цветное телевидение кажется полноцветным благодаря умелому соединению света этих трех основных цветов.

Внутренняя поверхность цветного телеэкрана покрыта тысячами мельчайших точек люминофора (рис. 13.3.7, а). Какие-то из этих точек излучают красный



**Рис. 13.3.7.** (а) Рисунок из точек (зерен) красного (К), зеленого (З) и синего (С) люминофора на внутренней поверхности кинескопа. Отверстия в маске позволяют (б) “синим” электронным лучам попадать только на синие точки, (в) “красным” — на красные и (г) “зеленым” лучам на зеленые точки.

свет, другие — зеленый, третьи — синий. Телевизор направляет электроны в эти точки через отверстия в металлическом экране, который называется маска. Три отдельных электронных луча, направленных под разными углами, проходят через отверстия и сталкиваются с люминофорами. Поскольку каждый луч может попасть в люминофорные точки только одного цвета (**рис. 13.3.7, б – г**), каждый луч регулирует яркость одного из трех цветов.

Несмотря на то что в некоторых кинескопах используются не точки, а нитевидные полоски люминофора и решетки вместо маски, основной принцип их действия сохраняется — лишь один электронный луч может попасть на данную нить люминофора. Эти маски и решетки внутри кинескопов настроены строго определенным образом. Поскольку они должны сохранять настройки и при нагревании под воздействием электронного потока, их изготавливают из специальных термокомпенсированных металлов — металлов с низкими коэффициентами объемного расширения. К сожалению, эти металлы ферромагнитны и легко намагничиваются — именно поэтому не стоит держать около цветного кинескопа сильные магниты. В противном случае возникшая намагниченность отклонит электронные пучки и вызовет искажения изображения и цвета. К счастью, многие современные телевизоры и компьютерные мониторы имеют встроенные системы магнитостатической коррекции, которые размагничивают кинескопы при включении.

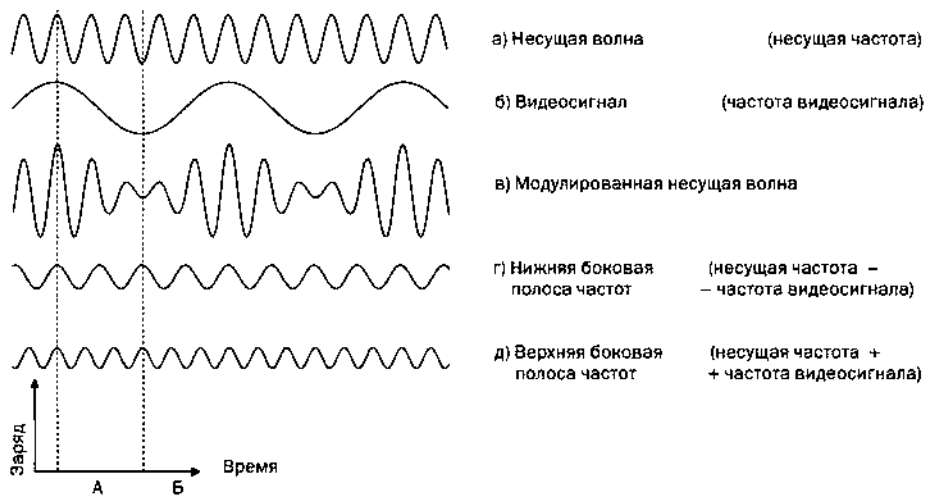
### Аналоговый видеосигнал

А теперь давайте займемся аналоговым видеосигналом — потоком информации, который говорит аналоговому телевизору, какие точки тот должен осветить и насколько ярко. Как я уже упоминал, в стандарте NTSC, принятом в США, применяются 60 частичных изображений (полукадров) в секунду, которые появляются чередующимися парами, образуя в общей сложности 525 горизонтальных линий. Первый кадр в каждой паре содержит только четные строки полного изображения, второй кадр — только нечетные. Так как первые 20 строк каждого кадра невидимы (в этот момент электронный луч возвращается в верхнюю часть экрана), то первый полукадр содержит линии 41, 43 ... 525, а второй полукадр — соответственно, линии 42, 44 ... 524. Количество точек на линии ограничено пропускной способностью видеосигнала, но редко превышает 440. Таким образом, в стандарте NTSC полное изображение (из двух полукадров) состоит примерно из 213 400 точек (485 видимых строк по 440 точек в строке) при суммарной скорости 30 кадров в секунду.

Монохромный видеосигнал NTSC содержит информацию о яркости и синхронизации. Такая комбинация известна как композитный видеосигнал. Например, в кабеле, при помощи которого вы соединяете выход DVD-проигрывателя со входом аналогового телевизора, видеосигнал представлен колебаниями напряжения в центральном проводе кабеля. Напряжение колеблется в диапазоне от  $-0,3$  до  $+0,7$  В. Напряжения от  $0,0$  до  $0,7$  В соответствуют уровню яркости от черного до белого. Однако для синхронизации процессов сканирования по горизонтали и вертикали сигнал на мгновение отклоняется до  $-0,3$  В. Один из таких “чернее черного” импульсов предвещает каждое прохождение по горизонтали, а строка таких импульсов предшествует каждому прохождению по вертикали.

Однако телевидение развивалось в радиозфере, где строго ограничены полосы пропускания. Когда в 1941 году часть драгоценного электромагнитного спектра была зарезервирована для черно-белого телевидения, Федеральное агентство по связи (FCC) выделило для каждого канала лишь по 6 МГц для передачи как видео-, так и аудиосигналов. Схема передачи, принятая форматом NTSC, предусматривает две отдельных несущих частоты, одну для видео- и вторую для аудиосигналов. Информация о видео занимает нижние 5,25 МГц полосы пропускания канала, аудио — верхние 0,75 МГц. Другими словами, требовалось, чтобы видеoinформация телеканала помещалась в диапазоне частот радиоволн шириной 5,25 МГц, а его звуковая информация — в прилегающих 0,75 МГц.

Слова “требовалось... чтобы помещалась” предполагают некоторую сложность в выполнении требования — как будто полоса пропускания шириной 5,25 МГц не может с легкостью “вместить” черно-белый видеосигнал. Но на самом деле задача и впрямь была непростой. Чтобы вы поняли, в чем суть проблемы,



**Рис. 13.3.8.** Телевизионная станция модулирует несущую волну (а) видеосигналом (б), в результате чего образуется модулированная несущая волна (в). В приведенном здесь частном случае зависимость видеосигнала от времени (б) описывается синусоидальной функцией, и, следовательно, модулированная несущая волна (в) является суммой трех простых волн: несущей волны (а), нижней боковой полосы волны (г) и верхней боковой полосы (д). Если в какой-то определенный момент времени (в точке А или Б) сложить волны (а), (г) и (д), то в сумме они дадут волну (в) в этот же момент времени. На рисунке показано количество заряда на передающей антенне, испускающей эти виды волн.

я покажу вам, что представление реального видеосигнала требует определенного диапазона частот и что этот диапазон тем шире, чем быстрее видеосигнал меняется во времени.

Согласно схеме NTSC, черно-белый видеосигнал передается с использованием амплитудной модуляции радиоволн. Подобно тому, как звуковой сигнал в АМ-радио модулирует количество заряда, которое радиостанция посылает вверх и вниз по антенне на несущей частоте, так и видеосигнал в аналоговом телевизоре NTSC модулирует количество заряда, которое телевизионная станция посылает вверх и вниз по его антенне на несущей видеочастоте.

При постоянном видеосигнале (например, при выключенной видеокамере) вверх и вниз по антенне движется постоянное количество заряда, и антенна излучает гармоническую радиоволну с постоянными амплитудой и частотой — несущую волну. На **рис. 13.3.8, а** показан заряд на антенне как функция времени, когда антенна излучает эту равномерную волну.

При включенной видеокамере видеосигнал начинает изменяться во времени. Сигнал модулирует количество заряда, движущегося вверх-вниз по антенне и, следовательно, изменяет амплитуду излучаемой радиоволны. В целом результаты этой модуляции достаточно сложны, так что давайте сначала рассмотрим самый простой пример. Если видеосигнал в зависимости от времени изменяется синусоидально (**рис. 13.3.8, б**) с частотой, которую мы назовем частотой видеосигнала, то модулированная несущая волна (**рис. 13.3.8, в**) будет напоминать исходную несущую волну — за исключением того, что ее амплитуда теперь имеет синусоидальную форму, как и у видеосигнала.

Данный выбор видеосигнала является частным случаем, потому что синусоидально модулированную несущую волну можно рассматривать как сумму трех гармонических волн: несущей и двух боковых — нижней боковой полосы (**рис. 13.3.8, г**) и верхней боковой полосы (**рис. 13.3.8, д**). Частота сигнала нижней боковой полосы равна частоте несущей волны минус частота видеосигнала, а частота верхней боковой полосы равна частоте несущей плюс частота видеосигнала. Вы можете убедиться, что несущая и две боковые полосы в сумме дают модулированную несущую волну. Если на **рис. 13.3.8** выбрать какие-то моменты времени — скажем, А или Б — и сложить заряды на антенне, соответствующие этим трем волнам в данных точках, то сумма будет равна заряду антенны, соответствующему модулированной несущей волне в тех же точках! По сути, модулированный заряд антенны можно рассматривать как состоящий из трех отдельных составляющих, которые перемещаются вверх и вниз по антенне с тремя слегка отличающимися частотами.

Несмотря на то что реальный видеосигнал изменяется чрезвычайно сложным образом, его всегда можно рассматривать как сумму различных синусоидальных составляющих с частотами в диапазоне от приблизительно 0 Гц до некоторой максимальной частоты. Когда этот сложный видеосигнал модулирует несущую волну, ка-

жая из его синусоидальных составляющих генерирует собственную пару боковых полос, одну ниже, другую выше несущей частоты. Таким образом, модулированная несущая волна лежит в диапазоне от несущей частоты минус максимальная частота видеосигнала до несущей частоты плюс максимальная частота видеосигнала.

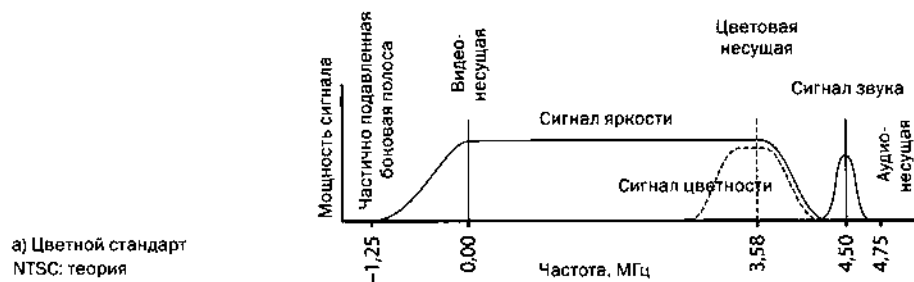
Теперь нам понятно, почему может быть трудно “втиснуть” видеосигнал в полосу радиочастотного спектра шириной 5,25 МГц. Если видеосигнал содержит синусоидальную часть с частотой 2,625 МГц, боковые полосы частот модулированной несущей должны охватывать интервал от 2,625 МГц ниже несущей до 2,625 МГц выше несущей — то есть весь диапазон 5,25 МГц. Если видеосигнал имеет любую синусоидальную составляющую с частотами выше 2,625 МГц, могут возникнуть проблемы... Это действительно так?

К сожалению, да. Согласно стандарту NTSC, аналоговый видеосигнал должен пройти все 213 400 точек на экране 30 раз в секунду, следовательно, частота его синусоидальных составляющих должна достигать 5,5 МГц. Если боковые полосы лежат на 5,5 МГц ниже и 5,5 МГц выше несущей частоты, для черно-белого видеосигнала NTSC, передаваемого средствами обычной амплитудной модуляции, потребуется диапазон радиочастотного спектра шириной 11,0 МГц.

Но официальная выделенная полоса составляет только 6 МГц, включая звук. Более того, цветной видеосигнал NTSC должен тоже уместиться в этом же диапазоне! Выполнить эти требования не легче, чем втиснуть слона в коробку из-под обуви. Однако оказывается, что это возможно — правда, немного снижается качество изображения.

## Слон в обувной коробке

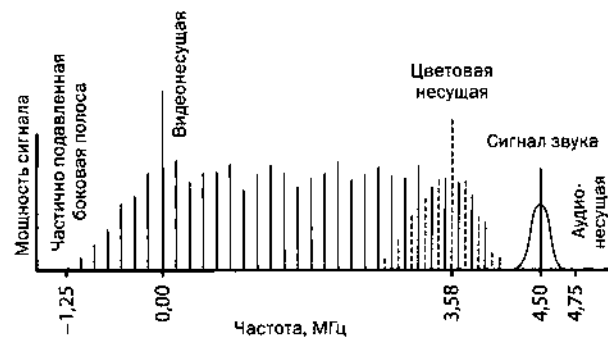
Чтобы поместить аналоговый телевизионный сигнал в выделенный для него диапазон шириной 6 МГц, приходится применять разнообразные хитрые приемы. Первый способ — использовать тот факт, что верхняя и нижняя боковые полосы несут одну и ту же, то есть избыточную информацию. Поскольку определенный отрезок синусоиды черно-белого видеосигнала образует как нижнюю, так и верхнюю боковые полосы, в действительности необходима только одна из этих боковых полос. Более того, трансляция обеих боковых полос — это пустая трата мощности передатчика. Поэтому телевизионные станции используют электронные фильтры, которые удаляют из передаваемого потока большую часть нижней боковой полосы (рис. 13.3.9, а). После фильтрования нижняя боковая полоса занимает не более 1,25 МГц ниже несущей. Несущая частота смещается вниз так,



а) Цветной стандарт NTSC: теория

Рис. 13.3.9. В стандарте аналогового телевидения NTSC в канал шириной 6 МГц помещены сигналы яркости, цветности и звука. (а) В теории нижние 1,25 МГц занимают бесполезные частично подавленные боковые полосы, а сигналы яркости и цветности накладываются.

(б) На практике сильный сигнал яркости наблюдается только на частотах, равных гармоникам горизонтальной развертки. Этот сигнал образует гребенку мощных радиочастот. Сигнал цветности также образует гребенку частот, зубцы которой чередуются с зубцами сигнала яркости.



б) Цветной стандарт NTSC: практика (упрощенно)

чтобы она была на 1,25 МГц выше нижней границы канала. Телевизионные приемники способны компенсировать отсутствие нижней боковой полосы. Нижнюю боковую полосу так сильно отфильтровывают, что этот метод даже называют частичным подавлением боковой полосы (VSB).

Чтобы дополнительно уменьшить полосу пропускания телевизионного сигнала, телевизионная станция подавляет и самую высокую частоту верхней боковой полосы. Вместо того чтобы находиться на 5,5 МГц выше несущей, верхняя боковая полоса доходит до уровня не выше 4,0 МГц над несущей частотой. При этом происходит незначительное снижение резкости изображения.

После фильтрации телевизионный сигнал занимает 5,25 МГц полосы пропускания вокруг несущей частоты: 1,25 МГц ниже несущей и 4 МГц выше нее. Телевизионная станция добавляет к передаче звук путем частотной модуляции отдельной несущей, как в обычном FM-радио. Частота этой отдельной аудионесущей на 4,5 МГц выше частоты видеонесущей волны.

С учетом звука разрешенная полоса пропускания 6 МГц практически заполнена. Каналам телевизионного вещания предоставлены частоты, отстоящие на 6 МГц друг от друга. Правда, они разбиты на группы (МВ — метровые и ДМВ — дециметровые волны), чтобы в диапазоне вещательных частот оставалось место для FM-радио, сотовых телефонов и других коммуникационных средств. Что касается кабельного телевидения, то внутри кабеля нет конкуренции за полосу пропускания с другими службами и доступен весь радиочастотный спектр. Поэтому кабельные каналы получают полосы, отстоящие на 6 МГц друг от друга во всем доступном для них диапазоне радиочастот.

Но как же быть с цветом? Когда в 1953 году NTSC утвердил стандарт цветного видео, было решено, что новый стандарт будет накладываться поверх действующего черно-белого таким образом, чтобы существующие черно-белые телевизоры могли получать цветные передачи. Цветной стандарт использовал то же самое распределение по 6 МГц, а информация о цвете вставлялась таким образом, чтобы черно-белые телевизионные приемники могли ее просто игнорировать. Это было настоящим чудом инженерной техники.

Цветной видеосигнал NTSC содержит две отдельные составляющие: исходный черно-белый видеосигнал, который теперь называется сигналом яркости, и новый сигнал цветности. Сигнал яркости несет информацию о яркости экрана, в то время как сигнал цветности — информацию о цвете элементов изображения. Чтобы сигналы не накладывались, сигнал цветности сдвигают вверх на 3,58 МГц — так называемую частоту цветовой поднесущей — таким образом, что он делит частоты с верхушкой частот верхней боковой полосы сигнала яркости. По причинам, связанным с временной структурой сигналов яркости и цветности (см. ❶), эти две электромагнитные волны прекрасно сосуществуют, и черно-белый телевизор даже не замечает сигнала цветности (рис. 13.3.9, б).

В цветном аналоговом телевизоре сигнал цветности управляет тремя электронными лучами. Он содержит два потока цветовой информации, которые, вкуче с информацией о яркости из сигнала яркости, создают на экране полноцветное изображение. Поскольку наши глаза гораздо чувствительнее к яркости, чем к цвету, сигнал цветности упрощен настолько, что занимает лишь небольшую часть полосы пропускания телепередачи.

Несущая звука, расположенная на 4,5 МГц выше видеонесущей, частотно модулируется звуковым сигналом. Обе ее боковые полосы остаются нетронутыми. Используются те же самые приемы, что и для стерео-FM-радио, хотя в данном случае стерео-пилот-сигнал расположен на частоте 15,734 кГц (15,750 кГц до эпохи цветного телевидения), в отличие от 19 кГц для обычного FM-вещания. Эта же частота — 15,734 кГц — используется для горизонтальной развертки ❷.

## Зачем переходить на цифровое телевидение?

Увы, несмотря на элегантную простоту и инженерное совершенство аналогового телевидения, его возможности недостаточно широки, чтобы оно могло выжить в наш цифровой век. Слабое разрешение, низкая энергоэффективность передачи, чувствительность к шуму и помехам — все это способствует его закату. Цифровое

❸ Решая вопрос, куда вставить сигнал цветности, разработчики стандарта NTSC воспользовались "дырами" в гребенке частотного спектра сигнала яркости. Поскольку соседние горизонтальные строчки, как правило, очень похожи, многие характеристики сигнала яркости повторяются со скоростью горизонтальной развертки. В результате этого повторения большинство частот в сигнале яркости совпадают с гармониками частоты горизонтальной развертки или находятся в непосредственной близости от них. Частоты, расположенные между гармониками, практически отсутствуют, поскольку они представляют весьма маловероятные случаи, когда соседние горизонтальные строки должны содержать противоположные яркостные характеристики. Разработчики стандарта NTSC вставили сигнал цветности в эти "тихие" промежутки между зубцами гребенки сигнала яркости. Они поместили цветовую поднесущую посередине между 227-й и 228-й гармониками частоты горизонтальной развертки и модулировали эту несущую двумя дополнительными видеосигналами, необходимыми для создания полноцветных изображений. Сигналы яркости и цветности отлично совмещаются и делят частотное пространство канала без заметного влияния друг на друга.

❹ При введении цвета в 1953 г. в стандарте NTSC было сделано небольшое изменение. Чтобы избежать ритмических помех между звуковой и цветовой несущими, частота горизонтальной развертки была снижена на 0,1% с 15 750 Гц до 15 734,264 Гц. Благодаря этому крошечному сдвигу разница в 4,5 МГц между аудио- и видеонесущими стала равна 286-й гармонике частоты горизонтальной развертки и появилась возможность вставить несущую цветности с частотой 3,579545 МГц точно посередине между 227-й и 228-й гармониками частоты горизонтальной развертки. Когда все эти важные частоты — горизонтальная развертка, видеонесущая, аудионесущая и цветовая поднесущая — синхронизированы описанным образом, проблема помех наложения исчезает. Побочным эффектом этого изменения стало снижение количества полукадров в секунду с 60 до 59,94. К счастью, существовавшие тогда черно-белые телевизоры даже не заметили эти изменения, и в течение почти 50 лет в эфире США царил стандарт аналогового цветного телевидения NTSC.

телевидение не имеет ни одного из этих недостатков, зато обладает рядом дополнительных достоинств.

Истоки проблем с разрешающей способностью в аналоговом телевидении кроются в отсутствии памяти: пропускная способность растрачивается на передачу избыточной информации. Поскольку каждая точка изображается в тот самый момент, когда информация о ней поступает в телевизор, нет никакой возможности сохранить пропускную способность “про запас”. Цифровое же телевидение, наоборот, использует хитроумные методы обнаружения и использования временных и пространственных закономерностей и повторов в изображениях. Таким образом избыточная информация удаляется из информационного потока. В результате этого сжатия и других технических приемов информационная полоса пропускания, которая поддерживает низкое разрешение в аналоговом телевизоре, может поддерживать более высокое разрешение в цифровом.

Энергетическая неэффективность аналогового телевидения обусловлена самой природой аналоговых сигналов и методов модуляции, которые используются для их трансляции. Большая часть передаваемой энергии тратится на несущие волны и бесполезные остатки нижней боковой полосы видеосигнала. Поскольку телевизор не получает никакой информации от несущей или нижней боковой полос, это пустая трата энергии. Более того, частотный спектр аналогового телевидения содержит много пиков и впадин, причем некоторые части этого спектра сильно перегружены, а другие участки, наоборот, используются отнюдь не в полную силу. Неравномерность спектра аналогового телевидения делает его восприимчивым к внешним радиочастотным помехам, чего можно было бы избежать, если бы спектр был более ровным.

Зато спектр цифрового телевидения, напротив, почти ровный — он примерно поровну эксплуатирует все доступные частоты, без каких-либо перегрузок или недостаточного использования отдельных частей спектра. Кроме того, цифровое телевидение тратит лишь минимальную часть передаваемой энергии на поддержание несущей частоты и бесполезных боковых полос. В целом в цифровом телевидении эффективность использования частотного спектра близка к идеальной, и оно передает сигнал практически без потерь энергии.

Чувствительность аналоговых телевизоров к шумам и помехам характерна для всех аналоговых систем: они не в состоянии отличать шумы физической величины, представляющей информацию, от самой информации. Электромагнитные помехи видеосигнала немедленно появляются непосредственно на экране как помехи изображения — “снег”, полосы, пунктирные и ломаные линии, сетки и так далее. Кроме того, задержка отражения сигнала приводит к раздваиванию, то есть к появлению фантомного изображения.

Цифровое телевидение гораздо менее чувствительно к шумам, поскольку дефекты поступающих сигналов можно полностью и надежно устранить до того, как они повлияют на изображение. Благодаря системам исправления ошибок и цифровой фильтрации цифровое телевидение может создавать идеальные изображения, даже если поступающие электромагнитные сигналы содержат значительные помехи.

## Технология цифрового телевидения

---

В то время как аналоговое телевидение работает с изображениями поточно в режиме реального времени, цифровое телевидение рассматривает изображение как еще одну разновидность данных, которые нужно сжать и пропустить через высокоскоростной канал связи. Сжатая звуковая информация использует этот же канал. Поскольку синхронизация достигается посредством декодирования данных с надлежащей скоростью, передача данных может не происходить обязательно в реальном времени. Такая гибкость позволяет усреднить нагрузку на канал, так что он используется с максимальной эффективностью. Так как все, что вы видите или слышите, проходит через этот канал, им мы и займемся.

В Соединенных Штатах параметры цифрового телевидения устанавливает Комитет по перспективным телевизионным системам (*Advanced Television Systems Committee*, ATSC) на основе работы группы, которая называется “Большой альянс”



(*Grand Alliance*), — это консорциум компаний, разрабатывающих стандарты цифрового телевидения. В стандарте ATSC для цифрового телевидения используются те же каналы по 6 МГц, которые десятилетиями использовало аналоговое телевидение. Каждый цифровой канал несет 10 762 Msps — мегасимволов в секунду (понятие "символ" обозначает цифру в той системе счисления, которую использует канал).

В двоичной системе (с основанием 2) существует только два символа — 0 и 1, однако цифровая передача необязательно должна быть двоичной. Например, в десятичной системе передачи (с основанием 10) будет 10 различных символов: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 и 9. Согласно решению ATSC, кабельное телевидение использует систему с шестнадцатью символами (0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, A, B, C, D, E и F), а цифровое эфирное телевидение — восьмеричную (с основанием 8) систему символов (0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 и 7). Все эти формы представления — цифровые, но теперь каждый символ несет информацию, составляющую более одного бита. В восьмеричной системе каждый символ несет три бита информации, в шестнадцатеричной — четыре.

При передаче с помощью радиоволн требуется электромагнитное представление символов. В цифровом телевидении символы кодируются как различные дискретные амплитуды несущей волны. Поскольку из-за шума две близко расположенные амплитуды трудно различить, размер группы символов ограничивается отношением сигнал/шум в приемнике. Если уровень шума низкий, группа символов может быть большой, поскольку даже небольшая разница в амплитудах несущей легко улавливается. При высоком уровне шума нужно выбирать меньшие группы символов.

Комитет по перспективным телевизионным системам поставил цель добиться менее одной неустраняемой ошибки в секунду. Выяснилось, что при кабельной передаче можно использовать 16 различных дискретных амплитуд. Однако для наземного эфирного вещания эта величина не равна точно 8. Несмотря на то, что стандарт ATSC базируется на системе с основанием 8 (то есть 8 различных амплитуд) для наземного эфирного вещания, к этому добавляется еще уровень кодирования, который уменьшает количество информации, приходящейся на один символ, на два бита, что равносильно использованию системы с основанием 4. На первый взгляд кажется, что такой способ кодирования обрезает поток информации, однако на самом деле благодаря этому канал становится менее уязвимым для радиочастотного шума и помех.

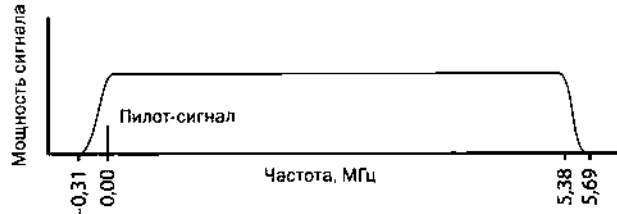
Переход на цифровое вещание начинается с оцифровывания и сжатия видео- и аудиосигналов. Если оставить в стороне вопросы аналого-цифрового преобразования, этот этап в основном сводится к математической обработке, поэтому я не буду на нем останавливаться. Сжатие видео основано на стандарте MPEG-2, разработанном группой специалистов под названием "Экспертная группа по движущемуся изображению" (*Moving Picture Experts Group*), сжатие звука использует стандарт Dolby AC-3. Несмотря на то, что при сжатии в формате MPEG-2 теряется часть информации об изображении, при сжатии с коэффициентом 10 потери, как правило, незаметны, а при сжатии с коэффициентом 60 изображение, как правило, получается вполне приемлемым. После сжатия изображение и звук представляются собой пакеты данных, которые нужно передать на телеприемник зрителя.

Перед передачей эти пакеты данных обрабатываются и слегка расширяются, чтобы включить информацию об исправлении ошибок. Эта дополнительная информация позволяет приемнику обнаружить и устранить большинство ошибок передачи, так что даже если приемник неправильно прочитывает некоторые символы по мере их поступления, он может исправить почти все ошибки. После включения информации об исправлении ошибок поток символов направляется в систему передачи для трансляции.

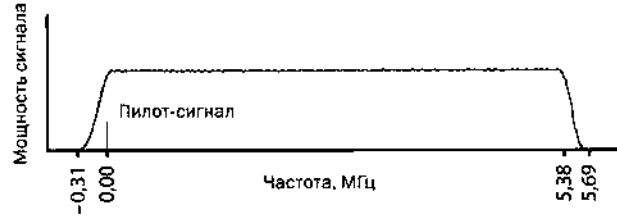
За передачу потока символов отвечает система вещания. Чтобы поместить поток в радиочастотный канал шириной 6 МГц, вновь используется амплитудная модуляция с частичным подавлением боковой полосы (VSB). Однако в цифровом телевидении, чтобы удалить частоты, выходящие за пределы канала 6 МГц, используются гораздо более сложные фильтры, чем в аналоговом. В аналоговом телевидении связанные с фильтрами ограничения требуют, чтобы несущая помещалась на 1,25 МГц выше нижней границы канала — и все частоты между нижней

**Рис. 13.3.10.** Цифровое телевидение стандарта ATSC заполняет канал 6 МГц потоком цифровых данных, содержащим как видео-, так и звуковую информацию. (а) Сложные расширенные фильтры отсекают с каждой стороны канала по 0,31 МГц, средний равномерный спектр частот шириной 5,38 МГц полностью используется для передачи информации. (б) На практике передача данных почти так же близка к идеалу, как в теории.

а) Цифровой стандарт ATSC: теория



б) Цифровой стандарт ATSC: практика



границей канала и несущей пропадают зря. В цифровом телевидении расширенный фильтр позволяет несущей располагаться всего на 0,31 МГц выше нижней границы канала (рис. 13.3.10 а), благодаря чему фильтр отсекает только нижние 0,31 МГц канала. Аналогичный фильтр отсекает и верхние 0,31 МГц канала. Поскольку средние 5,38 МГц канала по-прежнему доступны для информации, в цифровом телевидении из 6 МГц для передачи доступно 89,7% частот, что можно считать замечательным результатом. Такая схема цифровой передачи приближается к теоретическому пределу пропускной способности, известному как предел Шеннона (рис. 13.3.10, б). Это уже почти идеал.

Приемник обнаруживает радиочастотные электромагнитные волны, которые попадают в границы частот канала и извлекает поток символов. После исправления ошибок приемник передает символы системе воспроизведения. Процесс воспроизведения довольно прост — декодеры MPEG-2 и AC-3 представляют собой специализированные компьютеры, а экран — монитор компьютера. Поскольку в цифровом телевидении передача отделена от воспроизведения, разрешение изображения и скорость воспроизведения информации могут варьироваться в соответствии с потребностями. Благодаря этому часто несколько различных видеопрограмм могут делить один и тот же канал шириной 6 МГц.

Стандарты ATSC включают в себя разрешение изображений до 1080 линий и 1920 точек на линию, что дает 2 073 600 точек на изображение — это примерно в десять раз больше, чем разрешение аналоговых телевизоров стандарта NTSC. Кроме того, используется как обычное соотношение сторон экрана (4:3), так и широкий экран с соотношением 16:9. Частоты включают не только номинальные значения 30 Гц и 60 Гц стандарта NTSC, но и 24 Гц стандарта киноплёнки, поэтому многие кинофильмы и телевизионные шоу, записанные на плёнку, можно смотреть с наилучшим качеством.

Наконец, система воспроизведения звука также подверглась огромному улучшению по сравнению со стерео. Она обеспечивает до 5,1 аудиоканалов: левый, правый, центральный, левый задний, правый задний и специальный канал низкочастотных эффектов (дополнительная 1/10 канала). Так что если даже по телевизору не показывают ничего стоящего, выглядеть и звучать это все равно будет прекрасно.

## ГЛАВА 14

# СВЕТ

---

**М**ы уже знаем, что радиоволны и микроволны используются для связи и передачи энергии, но существует другая, еще более важная часть электромагнитного спектра: свет. Свет — это очень короткие электромагнитные волны очень высокой частоты. настолько высокой, что обычные антенны их не воспринимают. Вместо этого свет поглощается и испускается отдельными заряженными частицами вещества. Благодаря своим особым отношениям с заряженными частицами свет играет важную роль в физике, химии и материаловедении. Более того, это один из главных способов нашего взаимодействия с окружающим миром.

Люди занялись искусственным освещением, едва научившись обращаться с огнем, но в последнее время они открыли для этого множество новых способов. Костры, свечи, керосиновые лампы и газовые фонари уступили место менее романтичным, но более энергоэффективным и приятным глазу источникам света. Нас окружают люминесцентные и ртутные лампы, светодиоды и лазеры. Мы производим и используем свет для освещения, связи, развлечений, украшения, как инструмент в обработке металлов и хирургии и даже для удаления волос. Свет стал пользоваться таким спросом, что вспоминается поговорка: “В этом сезоне светлое — это новое черное”.

В этой главе мы возьмем несколько различных источников света и разберемся, как каждый из них производит свет. Кроме того, мы обсудим три разновидности света: тепловой, атомный резонансный и когерентный. Надеюсь, что, внимательно прочитав эту главу, вы увидите мир в совершенно новом свете.

### 476 14.1 Солнечный свет

*Как солнечный свет достигает наших глаз, раскрашивает небо и освещает все вокруг.*

### 483 14.2 Газоразрядные лампы

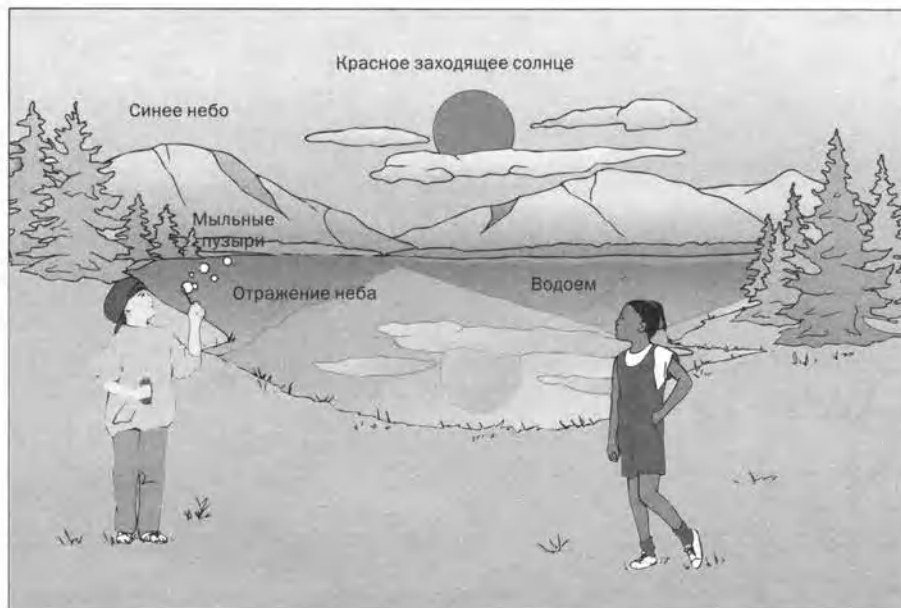
*Как газоразрядные лампы используют электричество для получения света.*

### 492 14.3 Лазеры и светодиоды

*Как лазеры производят высокоупорядоченный свет, а светодиоды — окрашенный.*

### 498 14.4 Краски и макияж

*Как пигменты и красители влияют на внешний вид людей и предметов.*



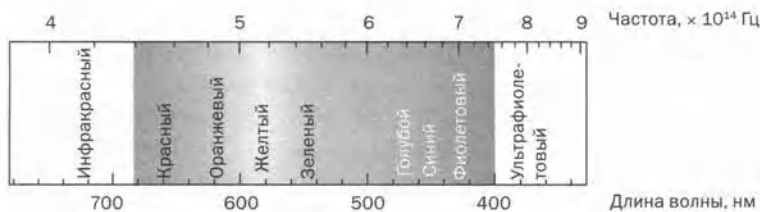
## Солнечный свет

Много тысячелетий люди следили за ходом времени по восходу и закату солнца. Каждое утро Солнце появляется на востоке в виде красного диска, потом бледнеет, поднимаясь в голубое небо, а в конце дня снова превращается в красный диск и заходит на западе. Солнечному свету нужно около 8 минут, чтобы пройти 150 000 000 км (93 000 000 миль) от Солнца до наших глаз. Этот свет обеспечивает большую часть энергии и тепла, необходимых для жизни на Земле. Свет солнечных лучей, по сути, всего лишь разновидность электромагнитных волн и мог бы войти в предыдущую главу, но он имеет такое огромное значение в повседневной жизни, что заслуживает особого внимания. Поэтому мы начнем с рассмотрения того, как солнечный свет взаимодействует с миром вокруг нас.

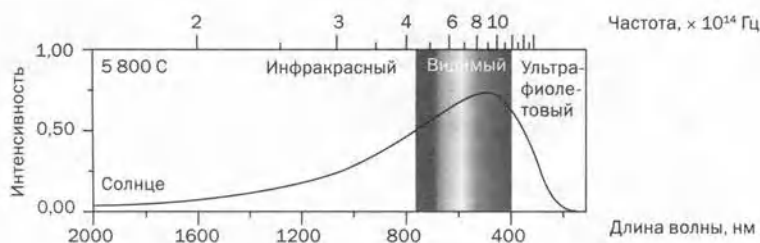
### Солнечный свет и электромагнитные волны

Электромагнитные волны могут быть любой длины, от тысяч километров до долей диаметра атомного ядра. Длина радиоволн и микроволн, которые мы рассматривали в предыдущей главе, превышает 1 мм. В этой главе мы обратимся к более коротким волнам, в частности тем, длина которых лежит в промежутке от 400 до 750 нм (напоминаю, что  $1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$ ). Мы воспринимаем эти волны как видимый свет, они же являются основными компонентами солнечного света. Поскольку электромагнитные волны солнечного света такие короткие, их частоты лежат между  $10^{14}$  и  $10^{15}$  Гц (рис. 14.1.1). Проходя мимо нас, одна из волн солнечного света за секунду успевает совершить почти 1 000 000 000 000 колебаний. Если производство микроволновых печей, которые работают с волнами гораздо большей длины и гораздо более низких частот, уже требует специализированных компонентов и крошечных антенн, то что же может испускать или поглощать световые волны? Ответ: отдельные заряженные частицы вещества. Эти частицы могут двигаться очень быстро, частота их колебаний составляет  $10^{14}$ – $10^{15}$  Гц и более. Двигаясь взад-вперед, заряженные частицы испускают световые волны. Точно так же прохождение световой волны заставляет отдельные заряженные частицы в веществах колебаться, при этом поглощая световые волны.

Солнечный свет возникает на внешней поверхности Солнца, в так называемой фотосфере. Там атомы и другие мельчайшие заряженные системы (главным образом ионизированные атомы и электроны) сталкиваются при температуре  $5800^\circ\text{C}$ . Приобретая при этом ускорение, заряженные частицы излучают электромагнитные волны.



**Рис. 14.1.1.** Видимая часть спектра солнечного излучения. Каждой длине волны соответствуют определенная частота и определенный цвет. По краям видимой части спектра располагаются области невидимых инфракрасного и ультрафиолетового излучений.



**Рис. 14.1.2.** Солнечный свет исходит из фотосферы Солнца, имеющей температуру 5800 °С. Распределение длин волн этого света такое же, как у абсолютно черного тела, основная интенсивность излучения приходится на видимую область электромагнитного спектра.

Поскольку солнечная поверхность излучает свет благодаря случайным тепловым движениям заряженных частиц, распределение излучения по длинам волн зависит только от ее температуры. Она излучает спектр абсолютно черного тела, как лампы накаливания, которые мы обсуждали в разделе 7.3. Так как температура фотосферы чрезвычайно высока — 5800 °С, все движения, столкновения и колебания совершаются очень быстро, в результате чего большую часть солнечного излучения составляет свет, относящийся к видимой части электромагнитного спектра (рис. 14.1.2).

Однако мы видим не все солнечные лучи. Инфракрасное излучение в спектре соседствует с видимым со стороны более длинных волн и низких частот. Наши глаза не воспринимают инфракрасный свет, но мы ощущаем его, когда находимся рядом с горячим предметом. В солнечном свете за инфракрасное излучение отвечают частицы, движущиеся медленнее остальных.

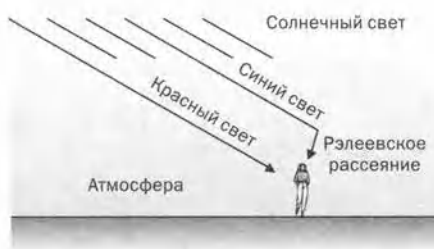
С коротковолновой, высокочастотной стороны от видимого света расположено ультрафиолетовое излучение. Его мы тоже не можем видеть, но ощущаем его присутствие, поскольку оно вызывает химические изменения молекул. Этот вид излучения является причиной ожогов кожи и способствует загару. В солнечном свете за ультрафиолетовое излучение отвечают частицы, движущиеся быстрее остальных.

## Как солнечный свет достигает Земли

Излучение Солнца движется к Земле со скоростью света. Но что же определяет эту величину? Как мы узнали из раздела 4.2, скорость света в вакууме — одна из фундаментальных мировых констант, равная 299 792 458 м/с. И хотя можно сказать, что скорость света определяется отношением между электрическим и магнитным полями, такое заявление недорого стоит. Потому что если вы зададитесь вопросом, чем определяется связь между электрическим и магнитным полями, ответ будет: скоростью света.

Вместо того чтобы объяснять, почему солнечный свет в вакууме путешествует так быстро, давайте посмотрим, что с ним происходит, когда он попадает в пространство, заполненное веществом. Ведь в конце концов солнечный свет достигает земной атмосферы, и в этот момент происходит несколько интересных вещей.

Во-первых, солнечный свет замедляется, когда его электрическое и магнитное поля начинают взаимодействовать с электрическими зарядами в атмосфере. Свет поляризует молекулы, с которыми он сталкивается, в результате чего его скорость снижается. Так как большинство прозрачных веществ гораздо сильнее



**Рис. 14.1.3.** Когда солнечный свет проходит через атмосферу, часть синего света подвергается рэлеевскому рассеянию вследствие взаимодействия с частицами воздуха. Перенаправленный синий свет мы видим как голубое небо. Остальной свет, который достигает наших глаз по прямой линии от Солнца, обычно кажется красноватым, особенно на восходе и закате.

реагируют на электрическое поле света, чем на его магнитное поле, мы сосредоточимся на электрических явлениях.

Коэффициент, который характеризует, насколько свет замедляется при прохождении через вещество, называется показателем преломления. Особенно медленно свет проходит через вещества, которые легко поляризуются, причем некоторые из них имеют показатели преломления 2 и даже 3. Поскольку воздух вблизи уровня моря лишь слегка склонен к поляризации, его показатель преломления равен всего 1,0003. Такое снижение скорости света слишком незначительно, чтобы его заметить, однако мы всегда замечаем поляризованные частицы воздуха, которые его вызывают. Именно эти поляризованные частицы воздуха и делают небо голубым.

Частицы воздуха состоят из отдельных атомов и молекул, небольших скоплений атомов и молекул, капель воды и пыли. Когда солнечная световая волна проходит через одну из этих частиц, частица поляризуется. Под воздействием электрического поля световой волны электрические заряды частицы начинают колебаться, порождая собственную новую электромагнитную волну.

Эта новая волна получает энергию от первоначальной волны. В сущности, частицы действуют как крошечные антенны, попеременно принимающие часть электромагнитной волны и тут же ретранслирующие ее в другом направлении. Процесс, в котором мельчайшая частица перенаправляет проходящую световую волну, называется рэлеевским рассеянием по имени английского физика лорда Рэля (Джона Уильяма Стретта, 1842–1919), который первым описал это явление.

Большая часть солнечных лучей путешествует по прямой и попадает нам прямо в глаза, однако некоторые из них подвергаются рэлеевскому рассеянию и доходят до нас более сложными путями. Прямые лучи мы видим как исходящие от сверкающего солнечного диска, а рассеянный свет придает всему небу достаточно однородный голубой цвет (**рис. 14.1.3**). Но почему именно голубой?

Небо кажется голубым (или синим) потому, что мельчайшие частицы воздуха, которые производят рэлеевское рассеяние солнечного света, слишком малы, чтобы стать для него хорошими антеннами. Из раздела 13.1 мы знаем, что антенна работает лучше всего, когда ее длина составляет одну четверть длины электромагнитной волны. Хуже всего частицы воздуха служат антеннами для длинноволнового красного света, поэтому очень незначительная часть красного солнечного света подвергается рэлеевскому рассеянию при прохождении через атмосферу. Но для коротковолнового синего света частицы воздуха — не такие уж плохие антенны. Часть синего солнечного света подвергается рэлеевскому рассеянию и действует на наши глаза с разных сторон. В результате мы видим этот рассеянный свет как голубое сияние неба\*.

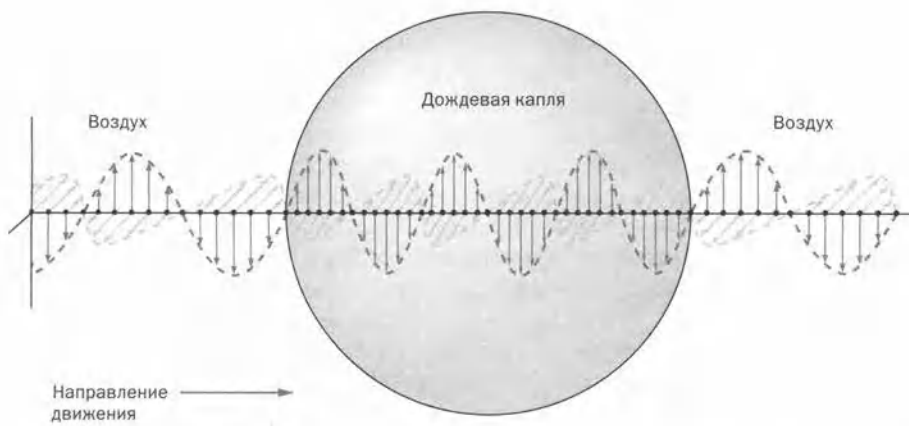
Рэлеевское рассеяние не только делает небо синим; оно также окрашивает в красный цвет восходы и закаты. Когда Солнце встает или садится, его свет, чтобы достичь ваших глаз, должен пройти большое расстояние через атмосферу Земли. Путь этот настолько велик, что большая часть синего света подвергается рэлеевскому рассеянию на расстоянии во много километров на восток или запад от вас, и все, что вы видите, — оставшийся красный свет. Иногда все небо кажется красным, потому что в вашем направлении просто не осталось синего света для рассеивания. Рассветы и закаты становятся особенно красочными, когда в атмосфере содержатся избыточная пыль или пепел, способные усилить рэлеевское рассеяние. Загрязнение воздуха, лесные пожары, извержения вулканов, как правило, создают необычайно красные восходы и закаты.

Облака и туманы, наоборот, кажутся белыми, потому что состоят из относительно крупных капель воды. Эти капли больше, чем длины волн видимого света, поэтому они рассеивают все волны солнечного света одинаково хорошо. Хотя это рассеяние часто настолько эффективно, что вы не видите сквозь облака солнечный диск, оно не придает облакам никакого цвета. Облако просто кажется белым.

## Радуги

Иногда капли воды разделяют цвета солнечного света. Когда солнечный свет падает на прозрачные круглые капли дождя, какими они бывают во время грозы, эти капли могут создавать радугу. Чтобы разобраться, как прозрачные шарики воды

\* Действительно, свет может рассеиваться в атмосфере на мельчайших пылинках или капелках воды, но не они дают главный эффект. Сразу после дождя, когда в воздухе мало пыли и капелек, небо выглядит особенно голубым, а пыль и капли придают ему серый цвет. Основное рассеяние в атмосфере происходит на флуктуациях плотности воздуха — мельчайших областях с повышенной или пониженной плотностью, ненадолго возникающих в результате беспорядочного теплового движения воздушных частиц.



**Рис. 14.1.4.** Когда электромагнитная волна входит в вещество, ее скорость уменьшается и волна сжимается. Длина волны уменьшается.

могут изогнуть путь солнечного света и разделить его в соответствии с длиной волны, мы должны понять три важных оптических явления: преломления, отражения и дисперсии. Мы уже сталкивались с ними при изучении волн на поверхности воды в разделе 9.3, но теперь перед нами другой пример: световые волны!

Давайте сперва посмотрим, что происходит, когда солнечная световая волна проходит непосредственно через дождевую каплю. Поскольку вода поляризуется в большей степени, чем воздух, внутри капли волна замедляется и ее длина уменьшается (**рис. 14.1.4**). Хотя замедление уменьшает длину волны света внутри капли, частота остается неизменной. При прохождении через каплю периодичность не исчезает, просто волна движется медленнее.

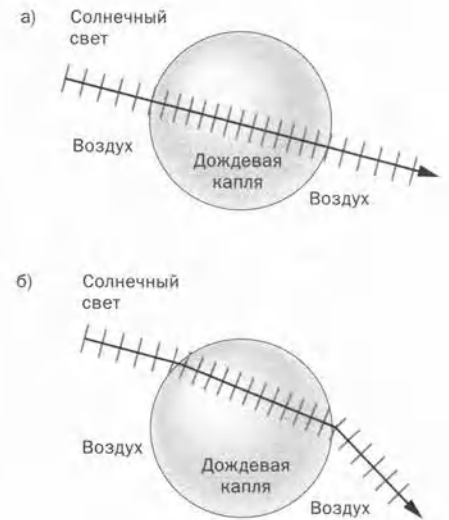
Если узкий луч солнечного света проходит через центр капли, он продолжает идти по прямой и выходит с противоположной стороны практически неизменным (**рис. 14.1.5, а**). Но когда световая волна входит в верхнюю часть капли, она при этом отклоняется (**рис. 14.1.5, б**). Это происходит потому, что нижняя часть волны первой войдет в воду и замедлится; затем верхняя часть обгонит ее и заставит отклониться вниз. Волна изменит направление так, чтобы “глубже” войти в воду.

Когда волна на **рис. 14.1.5, б** покидает каплю, ее верхняя часть выходит первой и ускоряется, в то время как нижняя часть отстает. Волна отклоняется вниз еще сильнее, она уже не направлена непосредственно в воздух и в сторону от воды.

Это изменение направления солнечного света на границах между средами или веществами и есть преломление. Оно происходит всякий раз, когда солнечный свет меняет скорость при прохождении границы между веществами под углом. Если солнечный свет на границе замедляется, он изменяет направление так, чтобы глубже войти в новую среду. Если свет на границе ускоряется, направление меняется таким образом, чтобы луч не так прямо вошел в новую среду. Чем сильнее меняется скорость, тем больше угол отклонения.

Однако часть солнечного света, падающего на границу между средами, вообще не проходит через нее. Вместо этого свет отражается. В разделе 9.3 мы объяснили отражение волн именно изменениями скорости волны на границе. Но более общей причиной отражения волн является рассогласование комплексного сопротивления, или импеданса, — резкое изменение характера движения волны в среде. Как известно, сопротивление является мерой противодействия системы прохождению тока или волны. В электромагнитной системе комплексное сопротивление показывает, какое напряжение или электрическое поле необходимы для получения тока или магнитного поля определенной величины. Другими словами, электрический импеданс показывает, насколько трудно действием электричества вызвать магнитные эффекты. Проявления импеданса широко распространены в природе (см. ❶), в частности, они характерны для механических волн и течений. Когда звуковые и водяные волны сталкиваются с рассогласованием (несоответствием) импеданса, происходит их частичное отражение.

Импеданс пустого пространства велик, потому что у электрического поля в нем нет ничего, что могло бы помочь в создании магнитного поля. Но внутри большинства веществ и сред у электрического поля есть на что опереться. Электрическое поле поляризует вещество, которое затем помогает создать магнитное



**Рис. 14.1.5.** Вид сбоку на два узких луча солнечного света, входящих и выходящих из капли. Поперечные линии обозначают максимальное электрическое поле. По мере того как свет в воде замедляется, линии становятся гуще.

❶ Когда электромагнитные волны проходят по проводам, отражение возникает при рассогласовании импеданса. Эти несоответствия, которых следует всячески избегать, возникают в телевизионных проводах, когда меняется связь между электрическим и магнитным полями. Если не установить устройство согласования импеданса при подключении антенного провода (300 В) ко входу видеокабеля (75 В), то в проводах возникает отражение, а на экране — помехи в виде остаточного изображения.

\* Доля отраженного света при его падении перпендикулярно границе равна  $((n - 1) / (n + 1))^2$ , где  $n$  — показатель преломления среды, в которую он попадает. Для воды  $n = 4/3$  и от границы воздух-вода и вода-воздух отразится около 2% падающего света. Для оконного стекла  $n = 1,5$  и отражается около 4%. Для алмаза с  $n = 2,42$  отражается около 17% падающего света. При наклонном падении света доля отраженного света возрастает и при больших углах падения стремится к 100%.

\* \* Здесь автор излагает свою трактовку отражения, отличную от общепринятой.

2 Песок выглядит белым, потому что он рассеивает солнечный свет во всех направлениях. Одно из объяснений этого явления состоит в том, что песчинки действуют как крошечные антенны, которые реагируют на электромагнитные световые волны и переизлучают их. Второе возможное объяснение заключается в том, что песчинки предоставляют солнечному свету тысячи границ воздух-песок, от которых он может отражаться. Но физика обоих объяснений, в сущности, одинакова — заряженные частицы песка электрически поляризуются проходящими через них волнами. Эти волны случайным образом перенаправляются без поглощения, и именно из-за них песок кажется белым.

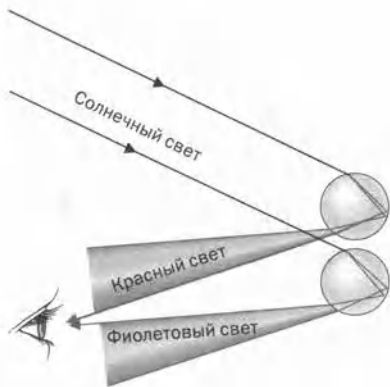


Рис. 14.1.6. При прохождении света через сферическую каплю происходит разделение цветов. На каждой границе воздух/вода фиолетовый свет отклоняется сильнее, чем красный, на выходе из капли они идут по разным направлениям. Вы видите красный свет, исходящий от верхней капли дождя, и фиолетовый — от нижней.

поле. Благодаря этой помощи комплексное сопротивление большинства веществ значительно меньше, чем импеданс пустого пространства. Поскольку воздух достаточно близок к пустому пространству, граница между воздухом и водой создаст рассогласование импеданса для света.

Прохождение через границу с рассогласованием импеданса нарушает баланс между электрическим и магнитным полями световой волны. Чтобы компенсировать дисбаланс, часть падающей волны отражается от границы. Таким образом, некоторая часть солнечного света отражается всякий раз, когда он входит или выходит из капли воды. Доля отраженного света зависит от степени рассогласования импеданса, но, как правило, при взаимодействии между воздухом и большинством прозрачных веществ, в том числе водой, она составляет около 4%\* (про отражение от песка см. 2). Металлы же, наоборот, поляризуются так легко, что их комплексное сопротивление практически равно нулю и они почти идеально отражают свет\*.\*.

Говоря о прохождении солнечного света через воду, следует отметить еще один важный момент: красный свет проходит через воду примерно на 1% быстрее, чем фиолетовый. Причина в том, что более высокочастотный фиолетовый свет поляризует молекулы воды немного легче, чем низкочастотный красный, поэтому увеличение поляризации замедляет прохождение фиолетового света. Эта зависимость скорости света в веществе от частоты называется дисперсией. Дисперсия влияет на преломление. Чем сильнее замедляется свет при вхождении в каплю, тем больше он отклоняется на границе. Так как фиолетовый свет замедляется больше, чем красный, он и отклоняется сильнее. Таким образом, волны различных цветов солнечного света проходят через капли различными путями.

Когда дождевые капли разделяют солнечный свет по цветам, образуется радуга. Чтобы ее увидеть, нужно встать спиной к Солнцу и смотреть на небо. Когда солнечный свет падает на дождевые капли, они перенаправляют часть лучей к вам. Так как каждая капля перенаправляет свет только в узком диапазоне углов, вы не можете видеть свет от каждой капли. По направлению к вам посылают видимый свет только капли, находящиеся в узкой дуге. Дуга кажется ярко окрашенной, потому что капли дождя по ее внутреннему краю направляют к вам фиолетовый свет, в то время как капли на внешнем крае дуги — красный. В середине этого промежутка видны все цвета радуги.

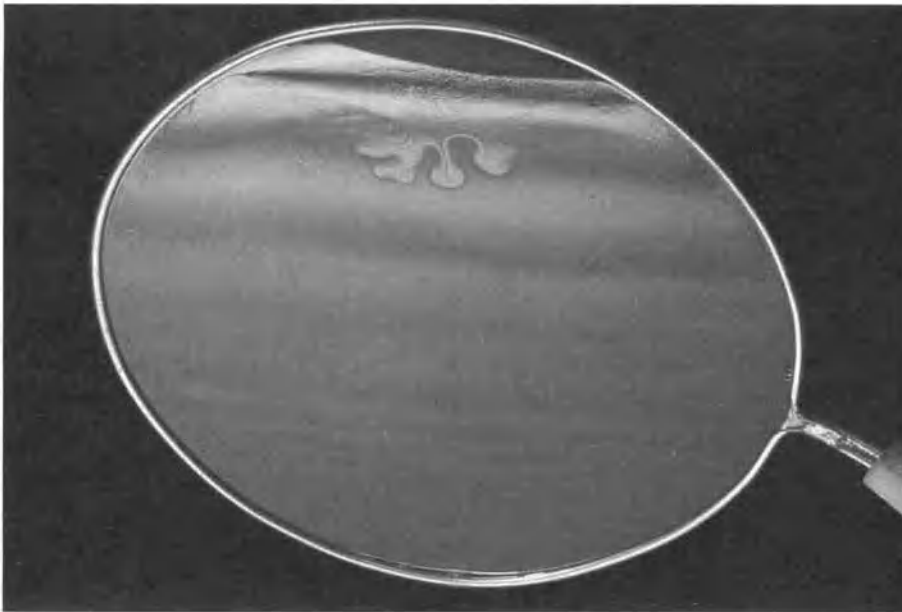
На рис. 14.1.6 изображено, как капля дождя перенаправляет свет разных цветов в разных направлениях. Притом что существует множество возможных вариантов прохождения световых лучей через капли, только такой путь может создать радугу. Солнечный свет входит в верхнюю часть капли и поворачивает внутрь. Фиолетовый свет отклоняется больше, чем красный, поэтому солнечный свет начинает разделяться по цветам. Кроме того, часть солнечного света отражается от капель дождя, но не участвует в образовании радуги.

Когда свет изнутри падает на заднюю поверхность капли, большая его часть выходит из капли и теряется. Но небольшая часть отражается от внутренней поверхности и продолжает путешествовать внутри капли. Когда этот свет достигает передней поверхности капли, большая его часть выходит наружу. При возвращении в воздушную среду фиолетовый свет отклоняется сильнее, чем красный, поэтому лучи разных цветов при выходе из капли распространяются в разных направлениях. Так как фиолетовый свет отклоняется вверх сильнее, чем красный, вы видите фиолетовый свет, исходящий от нижней капли дождя. Красный свет сильнее отклоняется вниз, поэтому вы видите красный, исходящий от верхней капли дождя. Таким образом, верхняя дуга радуги — красная, а нижняя — фиолетовая.

## Мыльные пузыри

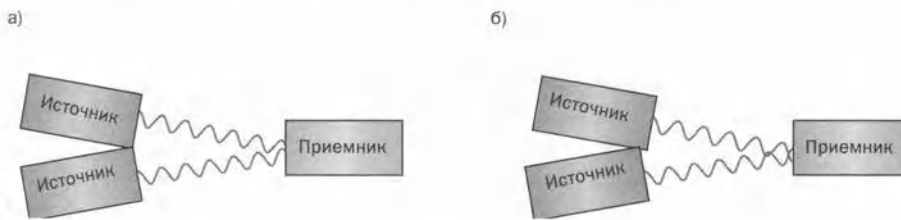
Мыльные пузыри также разделяют солнечный свет на отдельные цвета (рис. 14.1.7), но они используют другое волновое явление — интерференцию. Мы рассматривали интерференцию механических волн в разделе 9.3, когда изучали морской прибой (с. 340), и интерференцию электромагнитных волн в разделе 13.2, когда говорили о неравномерном приготовлении пищи в микроволновой печи (с. 461). В этой главе мы вернемся к интерференции на примере другого типа электромагнитных волн: световых.





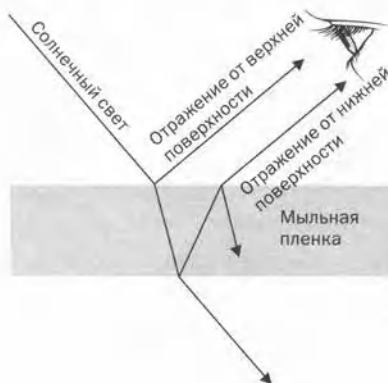
**Рис. 14.1.7.** Благодаря интерференции света, отраженного от верхней и нижней поверхностей мыльной пленки, мы видим ее окрашенной. Так как цвет определяется толщиной пленки, которая увеличивается сверху вниз, на пленке отображаются горизонтальные полосы цвета.

Интерференция света происходит вследствие сложения или наложения электромагнитных волн. Когда несколько световых волн накладываются друг на друга в определенном месте, их электрические поля, как и магнитные, суммируются. Если индивидуальные поля этих волн направлены одинаково, происходит конструктивная интерференция — волны суммируются на основе взаимного усиления, и интенсивность света в этом месте увеличивается (**рис. 14.1.8, а**). Но когда индивидуальные поля этих волн направлены в противоположные стороны, наблюдается деструктивная интерференция — при сложении волны гасят друг друга, и интенсивность света в этом месте уменьшается (**рис. 14.1.8, б**).

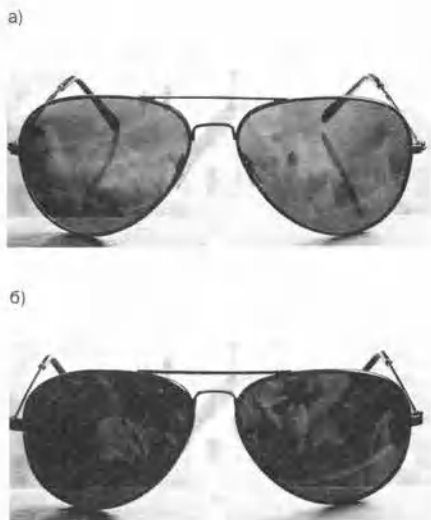


**Рис. 14.1.8.** (а) Когда волны от двух различных источников встречаются в приемнике в точке совпадения фаз, конструктивная интерференция вызывает в приемнике самый сильный эффект. (б) Когда волны приходят в противофазе, деструктивная интерференция приводит к слабому отклику.

Когда солнечные лучи отражаются от внешней поверхности мыльного пузыря, возникают обе формы интерференции. При падении каждой световой волны на тонкую пленку мыльной воды верхняя ближняя поверхность пленки отражает около 4% волны и еще 4% — нижняя дальняя (**рис. 14.1.9**). Так как обе отраженные волны распространяются в одном и том же направлении, отраженный свет, который вы видите, достигает глаза разными путями, по одному от каждого отражения. Если эти две волны находятся в фазе, то есть их электрические поля



**Рис. 14.1.9.** Солнечный свет отражается как от верхней, так и от нижней поверхности мыльной пленки. Отражение от нижней поверхности отстает по сравнению с отражением от верхней, потому что ему нужно дважды пройти сквозь слой пленки. Если две отраженные волны приходят в фазе, вы видите яркую картинку. Если они в противофазе, отражение тусклое.



**Рис. 14.1.10.** (а) Обычные темные очки просто затемняют изображение. (б) Поляризационные защитные очки блокируют горизонтально поляризованный свет, основной компонент бликов.

\* При падении света, близком к скользящему (автор называет это небольшим углом падения, но в оптике угол падения всегда считается от перпендикуляра к поверхности, поэтому оптик назовет это большим углом падения) свет с обоими вариантами поляризации почти на 100% отразится и останется не поляризованным. А вот при промежуточных углах падения, близких к так называемому углу Брюстера (для воды это 53 градуса), отраженный свет состоит в основном из горизонтально поляризованного.

\* \* Разные участки неба имеют разную поляризацию рассеянного света. Направление поляризации перпендикулярно направлению на Солнце.

синхронизированы и усиливают друг друга, вы видите очень яркое отражение, возникающее благодаря интерференции. Если две волны приходят в противофазе (их электрические поля гасят друг друга), вы видите очень тусклое отражение, возникающее благодаря деструктивной интерференции.

Какую именно интерференцию — конструктивную или деструктивную — вы наблюдаете, зависит от длины волны солнечного света. Отражение от нижней поверхности должно дважды пройти через мыльную пленку, поэтому оно отстанет относительно отражения от верхней поверхности. Если задержка достаточно велика, чтобы волна успела совершить целое число циклов, то обе отраженные волны, направленные к глазу, находятся в фазе друг с другом и вы видите яркое отражение. Если задержка позволяет отражению от нижней поверхности совершить дополнительную половину цикла, то две отраженные волны находятся в противофазе и отражение оказывается тусклым.

Солнечный свет содержит множество волн разной длины, которые по-разному ведут себя при отражении. Окрашенные отражения, которые мы видим, состоят в основном из тех волн, которые подверглись конструктивной интерференции, то есть имеют определенную длину. Поскольку задержка отражения от дальней поверхности зависит от толщины мыльной пленки, по распределению цветов на пленке можно определить ее толщину.

## Солнечный свет и поляризационные очки

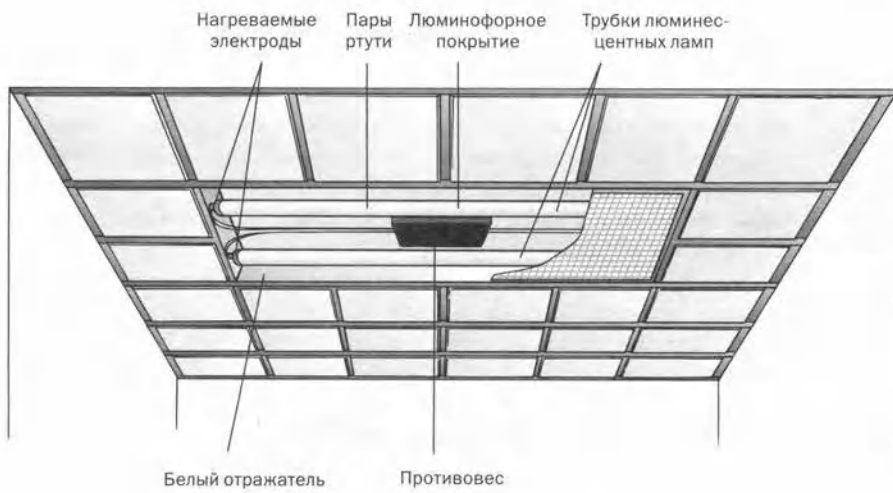
Все солнцезащитные очки поглощают часть проходящего через них солнечного света, но лучшие из них поглощают горизонтально поляризованный свет сильнее, чем вертикально поляризованный. Такие поляризационные защитные очки значительно уменьшают блики, отсекая большую часть света, отражаемого от горизонтальных поверхностей.

Когда свет падает на прозрачную поверхность под прямым углом, около 4% света отражается независимо от поляризации. Но когда свет падает на горизонтальную поверхность под небольшим углом, горизонтально поляризованный свет отражается гораздо сильнее, чем вертикально поляризованный\*. Дело в том, что в горизонтальном электрическом поле горизонтально поляризованного света электрические заряды колеблются взад-вперед вдоль поверхности. Сдвинуть заряды в этом направлении относительно легко, и поверхность тем легче поляризуется, чем меньше угол падения света на отражающую поверхность. В результате поверхность отражает больше горизонтально поляризованного света под маленькими углами, чем под большими.

Что касается вертикально поляризованного света, то в его электрическом поле заряды колеблются вертикально вверх-вниз. При небольших углах падения это поле действует на заряды, пытаясь заставить их колебаться вверх-вниз относительно горизонтальной поверхности. Но так как заряды не могут выйти за пределы поверхности, поверхность труднее поляризуется при небольших углах падения. Горизонтальная поверхность плохо отражает вертикально поляризованный свет, и существует даже особый угол, угол Брюстера, при котором отражения вертикально поляризованного света вообще не происходит.

Прямой солнечный свет представляет собой равномерную смесь вертикально и горизонтально поляризованных волн. Поскольку горизонтально поляризованные волны лучше всего отражаются от горизонтальных поверхностей, защитные очки, которые поглощают горизонтально поляризованный свет, не дадут вам увидеть большую часть этого отраженного света (**рис. 14.1.10**). Вот почему поляризационные защитные очки настолько эффективны для борьбы с бликами.

В то же время рассеянный свет от голубого неба (рэлеевское рассеяние), как правило, представляет собой главным образом горизонтально поляризованный свет, который поглощается поляризационными стеклами. Именно поэтому голубое небо выглядит относительно темным, когда вы смотрите на него через поляризационные очки\*\*.



## 14.2. Газоразрядные лампы

Решающую роль в современном освещении играет энергоэффективность. В то время как лампы накаливания обеспечивают приятный глазу теплый свет, большая часть потребляемой ими энергии теряется в форме невидимого инфракрасного света. При таком же потреблении электроэнергии люминесцентные и другие газоразрядные лампы производят гораздо больше видимого света, поэтому сейчас они больше используются в освещении офисов, производственных помещений и улиц. В этом разделе мы рассмотрим несколько типов газоразрядных ламп: люминесцентные, ртутные, натриевые и металлогалогенные лампы, у которых есть одно общее свойство — ток в них проходит через газ.

### Как мы видим свет и цвет

Прежде чем заняться газоразрядными лампами, давайте разберемся, как наши глаза распознают цвет. Можно предположить, что они каким-то образом измеряют длину световых волн, однако это не так. На самом деле сетчатка человеческого глаза содержит три группы светочувствительных клеток или рецепторов — так называемых колбочек, которые реагируют на три различных диапазона длин волн. Первая группа колбочек реагирует на световые волны с длиной около 600 нм и позволяет нам видеть красный цвет, вторая — на свет с длиной волны около 550 нм (зеленый), третья — на свет с длиной волны около 450 нм, что соответствует синему цвету (рис. 14.2.1). Наибольшее скопление колбочек находится в центральной области наибольшей остроты зрения.

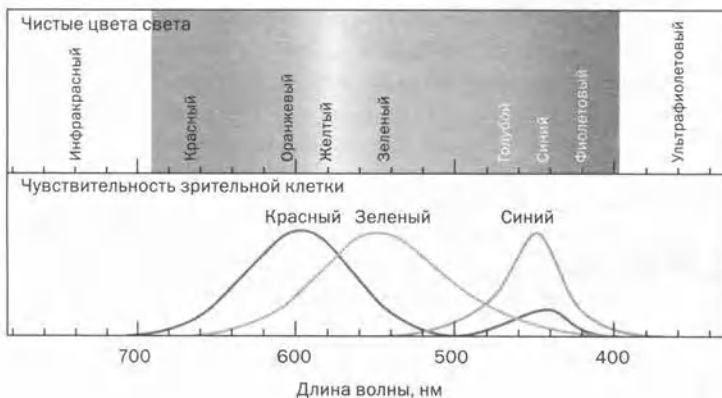


Рис. 14.2.1. “Красные” колбочки нашей сетчатки чувствительны к свету с длиной волны около 600 нм, “зеленые” — около 550 нм, “синие” — около 450 нм. “Красные” рецепторы также реагируют на свет с длиной волны около 440 нм, при этом мы видим фиолетовый.

а) Аддитивная система (свет)



б) Субтрактивная система (краски)



**Рис. 14.2.2.** (а) Основные цвета света (аддитивная система) — красный, зеленый и синий — в комбинации могут давать свет любого цвета. (б) Основные краски или цвета субтрактивной системы — голубой, пурпурный и желтый — вычитают соответственно красный, зеленый и синий из отраженного или преломленного света и в комбинации могут давать краски любого цвета.

В нашей сетчатке имеется и другая разновидность клеток — палочки, чья светочувствительность выше, чем у колбочек, но они не могут различать цвета. Больше всего палочек в области периферийного зрения, они дают нам возможность видеть в темноте.

То, что у нас всего три типа цветочувствительных клеток, не означает, что мы можем видеть только три цвета. Когда одновременно стимулируются два или три типа колбочек, мы видим и другие цвета. Каждый тип колбочек передает сведения о количестве света, который они распознают, в мозг, а он интерпретирует комбинированную информацию в виде определенного цвета.

Свет с определенной длиной волны стимулирует все три типа колбочек одновременно, однако клетки реагируют неодинаково. При длине волны 680 нм “красные” колбочки будут реагировать гораздо сильнее, чем “зеленые” или “синие”. Благодаря преобладающей реакции “красных” колбочек свет покажется нам красным.

Световые волны других длин стимулируют три типа колбочек более равномерно. Свет с длиной волны 580 нм находится между красным и зеленым. И “красные”, и “зеленые” колбочки в этой области реагируют примерно одинаково, и мы воспринимаем этот свет как желтый.

Но мы точно так же видим желтый цвет, когда смотрим на равную смесь красного с длиной волны 640 нм и зеленого с длиной волны 525 нм. Свет с длиной 640 нм стимулирует “красные” колбочки, 525 нм — “зеленые”. Даже при отсутствии света с длиной волны 580 нм мы видим такой же желтый цвет, как в предыдущем случае.

Таким образом, смешение красного, зеленого и синего позволяет нам видеть практически любой цвет. По этой причине эти три цвета называются основными цветами света или основными цветами аддитивной системы (**рис. 14.2.2, а**). В цветных телевизорах и компьютерных дисплеях для производства полноцветных изображений используют очень маленькие источники красного, зеленого и синего цветов.

Хотя принцип смешения основных цветов можно применить и к краскам, чернилам и пигментам, там используется другая система. Основные краски или цвета субтрактивной системы — голубой, пурпурный и желтый (**рис. 14.2.2, б**). Когда одна из этих красок попадает на белую поверхность, она поглощает или вычитает один из основных цветов света из отражения от поверхности. Голубой вычитает отражение красного, пурпурный вычитает отражение зеленого, а желтый — отражение синего. В цветных принтерах, фотографиях, книгах и журналах для производства полноцветных изображений используют крошечные точки голубого, пурпурного и желтого пигментов.

## Больше света, меньше тепла: газовый разряд

Когда все три цвета типа наших рецепторов-колбочек реагируют примерно одинаково, мы видим белый свет. Дело в том, что наше зрение развивалось под действием единственного раскаленного источника света Солнца. Солнечный свет стимулирует “красные”, “зеленые” и “синие” колбочки примерно в равной степени, поэтому любой другой источник “белого света” должен делать то же самое.

Несмотря на то, что лампы накаливания успешно производят белый свет, они страдают двумя серьезными недостатками. Во-первых, из-за того, что нить не может достичь температуры поверхности Солнца (5800 °C), спектр абсолютно черного тела, соответствующего этой лампе, содержит слишком мало синего света и кажется более красным, чем солнечный свет. Во-вторых, поскольку большая часть электромагнитного излучения лампы накаливания приходится на невидимый инфракрасный свет, об эффективном использовании энергии для получения видимого света здесь даже речи быть не может.

К счастью, современная наука дает нам альтернативные источники света — источники, которые не используют тепло и тепловое излучение. К их числу относятся и газоразрядные лампы, излучающие свет при прохождении электрического тока через газы. Среди газоразрядных ламп есть цветные, но есть и такие, которые очень успешно производят белый свет. И многие из них гораздо более энергоэффективны, чем лампы накаливания.

Чтобы получить представление о газовых разрядах и о том, как они испускают свет, давайте начнем с одного из самых простых примеров: неоновой трубки. Хотя ее ярко-красное свечение не годится для освещения и не особенно энергоэффективно, зато неоновая трубка отлично подходит для уличных знаков, а самое главное — ее устройство относительно легко понять.

Неоновая лампа представляет собой герметичную стеклянную трубку, содержащую чистый газообразный неон, плотность которого составляет менее 1% от плотности наружной атмосферы. На каждом конце впаяны металлические электроды, так что электрический ток может войти в трубку по одному электроду и выйти по другому. Как известно, газы обычно являются диэлектриками, и неон — не исключение. Чтобы превратить неон в трубке в проводник, к электродам прикладывается высокое напряжение. Как мы видели в разделе 10.2, “пробой” газа происходит при воздействии высоких градиентов потенциала, когда небольшое количество естественных ионов инициирует лавину ионизирующих столкновений, в результате чего газ быстро наполняется заряженными частицами и становится проводником.

В то время как в обычном воздухе пробой происходит при напряженности электрического поля около 30 000 В/см, в трубке плотность неона настолько мала, что пробой происходит при гораздо более низких значениях градиента потенциала. Объясняется это тем, что в разреженном газе заряженные частицы перед каждым столкновением могут проходить больший путь и накапливать больше кинетической энергии. Когда напряжение между электродами неоновой трубки составляет около 10 000 вольт, происходит пробой и газ начинает испускать хорошо знакомое нам красное свечение.

После этого в лампе возникает разряд, то есть ток течет через газовую неоновую среду. Этот ток состоит в основном из электронов, перетекающих от отрицательно заряженного электрода к положительно заряженному (рис. 14.2.3). Несмотря на частые столкновения с атомами неона, масса электронов так мала, что обычно они просто отскакивают от атомов неона, почти не теряя энергии. Можно сравнить это с тем, как шарик для настольного тенниса оттолкнулся бы от слона, попрыгал и затем продолжил бы свой путь.

Однако зачастую при столкновении электрона с атомом неона происходит нечто другое: атом неона меняет внутреннюю структуру и поглощает часть кинетической энергии электрона. Электрон отскакивает с меньшей энергией, чем у него была до столкновения, а атом неона продолжает испускать свет, скорее всего, красный. Чтобы понять, почему этот свет, вероятнее всего, именно красный, нам придется погрузиться в квантовую физику и строение атома неона.

## Атомы, свет и квантовая физика

В соответствии с теорией корпускулярно-волнового дуализма (мы уже говорили о ней в разделе 12.1), электроны обладают свойствами как частицы, так и волны, но проще понять электрон, рассматривая его как волну. Как и все объекты в нашей Вселенной, при перемещении с места на место электроны движутся как *волны*, и только если специально их искать, можно обнаружить их в виде *частиц* в определенных местах (см. ❶).

В атоме каждый электрон существует в форме стоячей волны, которая называется орбиталью. Каждая орбиталь характеризуется определенной энергией и квантовой частотой. Хотя орбитали представляют собой трехмерные стоячие волны, они напоминают двумерные стоячие волны барабанной мембраны (рис. 9.2.7 на с. 327). Как и колебательные моды мембраны, орбитали отличаются друг от друга структурой узлов — поверхностей, на которых амплитуда электронной волны равна нулю.

Как и уровни в твердом теле, атомные орбитали можно рассматривать как определенные участки пространства, которые могут быть заняты или не заняты электронами. С этой точки зрения атомные орбитали заполняются электронами, начиная с минимальной энергии и далее по возрастающей. В соответствии с принципом Паули, каждая орбиталь вмещает два электрона, один “спин-вверх” и один “спин-вниз”, и так, пока все электроны атома не будут размещены. Химические свойства любого атома и его расположение в периодической таблице элементов (рис. 14.2.4)

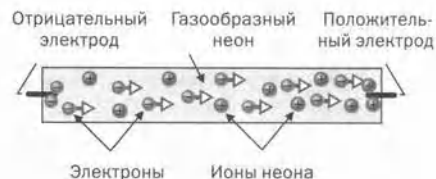


Рис. 14.2.3. В неоновой трубке электроны проходят через среду из газообразного неона низкого давления. Эти электроны сталкиваются с атомами неона, передают им энергию и тем самым заставляют их испускать свет, главным образом красный. Положительно заряженные ионы неона, образующиеся при некоторых столкновениях, не дают электронам отталкивать друг друга к стенкам трубки.

❶ В 1927 году американские физики Клинтон Джозеф Дэвиссон (1881–1958) и Лестер Хэлберт Джермер (1896–1972) показали, что электроны движутся в виде волн. Они наблюдали интерференционные эффекты при отражении электронов от различных атомных слоев в кристалле металлического никеля. Когда различные электронные волны поступали в детектор в фазе, прибор показывал много электронов. Когда волны прибывали не в фазе, прибор обнаруживал всего несколько электронов. Их работе помогла поломка, когда в стеклянные вакуумные трубки случайно попал воздух. Тщательно удаляя кислород из образца никеля после утечки, ученые смогли довести до совершенства его кристаллическую структуру, что позволило наблюдать интерференцию.

Рис. 14.2.4. Периодическая система элементов Д. И. Менделеева построена в соответствии с принципом заполнения электронных орбиталей. Как правило, оболочки заполняются электронами слева направо. Количество электронов в нейтральном атоме равно порядковому номеру в таблице.

← заполнение 1s-орбитали																		→						
① 1	② 2																	③ 3	④ 4					
H	He																							
← заполнение s-орбитали												← заполнение p-орбиталей												
① 3	② 4											⑤ 5	⑥ 6	⑦ 7	⑧ 8	⑨ 9	⑩ 10							
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne							
① 11	② 12	← заполнение d-орбиталей										⑬ 13	⑭ 14	⑮ 15	⑯ 16	⑰ 17	⑱ 18							
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar							
① 19	② 20	③ 21	④ 22	⑤ 23	⑥ 24	⑦ 25	⑧ 26	⑨ 27	⑩ 28	⑪ 29	⑫ 30	⑬ 31	⑭ 32	⑮ 33	⑯ 34	⑰ 35	⑱ 36							
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr							
① 37	② 38	③ 39	④ 40	⑤ 41	⑥ 42	⑦ 43	⑧ 44	⑨ 45	⑩ 46	⑪ 47	⑫ 48	⑬ 49	⑭ 50	⑮ 51	⑯ 52	⑰ 53	⑱ 54							
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe							
① 55	② 56	③ 57	④ 72	⑤ 73	⑥ 74	⑦ 75	⑧ 76	⑨ 77	⑩ 78	⑪ 79	⑫ 80	⑬ 81	⑭ 82	⑮ 83	⑯ 84	⑰ 85	⑱ 86							
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn							
① 87	② 88	③ 89	④ 104	⑤ 105	⑥ 106	⑦ 107	⑧ 108	⑨ 109	⑩ 110	⑪ 111	← заполнение f-орбиталей													
Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	⑫ 58	⑬ 59	⑭ 60	⑮ 61	⑯ 62	⑰ 63	⑱ 64	⑲ 65	⑳ 66	㉑ 67	㉒ 68	㉓ 69	㉔ 70	㉕ 71
											Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
											⑳ 90	㉑ 91	㉒ 92	㉓ 93	㉔ 94	㉕ 95	㉖ 96	㉗ 97	㉘ 98	㉙ 99	㉚ 100	㉛ 101	㉜ 102	㉝ 103
											Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

- ① Щелочные металлы — очень активные металлы с высокой реакционной способностью, как правило, склонны отдавать единственный s-электрон, чтобы освободить внешнюю оболочку
- ② Щелочноземельные металлы — умеренно активные металлы, как правило, тоже склонны отдавать s-электроны
- ③ Переходные металлы — обычные близкие по свойствам металлы, отличаются только количеством d-электронов
- ④ Постпереходные металлы — группа элементов с различными свойствами, напоминающими металлы
- ⑤ Полуметаллы (металлоиды) — промежуточные между металлами и неметаллами элементы
- ⑥ Неметаллы — полупроводники и диэлектрики
- ⑦ Галогены — активные элементы с высокой реакционной способностью, как правило, склонны присоединить один p-электрон, чтобы до конца заполнить внешнюю оболочку
- ⑧ Благородные или инертные газы — химически неактивные газы с полностью заполненными внешними оболочками
- ⑨ Лантаноиды — умеренно активные металлы, отличаются только количеством 4f-электронов
- ⑩ Actиноиды — умеренно активные металлы, отличаются только количеством 5f-электронов

определяются количеством имеющихся у него электронов и тем, как эти электроны заполняют доступные орбитали. Атомы электрически нейтральны, так что количество отрицательно заряженных электронов в атоме равно количеству положительно заряженных протонов в ядре и равно его порядковому номеру в таблице.

Как мы знаем, в физике твердого тела существуют правила заполнения уровней, которые обуславливают наличие разрешенных и запрещенных зон — ими определяются различия различия между твердыми веществами. Точно так же существуют и правила заполнения атомных орбиталей, которые обуславливают наличие электронных оболочек и энергетических уровней, а те, в свою очередь, определяют различия между атомами. Электронная оболочка, или уровень, — это группа орбиталей, которые обладают близкими энергиями и, как правило, заполняются электронами приблизительно одновременно. Несмотря на то, что конфигурация орбиталей и оболочек осложняется взаимным влиянием заряженных электронов и взаимным искажением стоячих волн друг друга, многие свойства атомов определяются именно тем, какие орбитали заняты электронами.

Атомные орбитали обозначаются целым числом и буквой, причем и то и другое определяется структурой узлов. Целое число (1, 2, 3...) на единицу больше количества узловых поверхностей в орбитали (0, 1, 2...), оно соответствует номеру оболочки. Оболочка состоит из подуровней, которые обозначаются буквами. Буквы (s, p, d, f, g, h...) показывают, сколько таких узловых поверхностей проходит

через центр атома (0, 1, 2, 3, 4, 5...). При этом определенный подуровень может содержать только определенное количество орбиталей: одну s-орбиталь, три p-орбитали, пять d-орбиталей, семь f-орбиталей и т. д.

В атоме неона 10 электронов, для размещения которых нужно 5 орбиталей. Первые два электрона занимают 1s-орбиталь, основную моду с нулевым количеством узлов. Заполнение 1s-орбитали завершает первую электронную оболочку. Следующие два электрона переходят в 2s-орбиталь, имеющую одну узловую поверхность, которая не проходит через центр атома. Наконец, последние шесть электронов неона заполняют три 2p-орбитали, каждая из которых имеет одну узловую поверхность, проходящую через центр атома. Так как заполнение 2s- и 2p-орбиталей завершает вторую электронную оболочку, атом неона (Ne на рис. 14.2.4) является химически инертным. Именно поэтому неон существует в виде газа, состоящего из отдельных атомов!

Распределение электронов по орбиталям называется состоянием. Состояние атома неона, которое мы только что описали, является его основным состоянием, так как характеризуется минимальной возможной полной энергией. Атом неона может существовать и в других состояниях, но все они связаны с дополнительной энергией. Вот где на сцену выходит разряд. Когда заряженная частица сталкивается с атомом неона в основном состоянии, существует вероятность, что в результате столкновения электрон перейдет со своей обычной орбитали на одну из пустых орбиталей. Тогда атом неона будет находиться в возбужденном состоянии, то есть будет обладать дополнительной энергией.

Предположим, например, что столкновение только что переместило один из электронов атома неона с 2p-орбитали на 3p-орбиталь. Атом быстро совершит серию переходов от одного состояния к другому, но в конечном итоге вернется в свое основное состояние. На каждой стадии атом испускает фотон и переходит из более высокого в более низкое энергетическое состояние. Фотон уносит энергию, выделяющуюся при этом переходе. Весьма вероятно, что на одной из этих стадий электрон перейдет с 3p-орбитали на 3s-орбиталь и произведет испускание фотона красного света — того самого красного, что в рекламной неоновой трубке!

Пока электрон остается на 3p-орбитали — то есть представляет собой определенную стоячую волну, — он не может излучать электромагнитные волны. Этой стоячей волне присущи квантовые колебания, однако это внутренние колебания электрона, в целом же ни электрон, ни его заряд не движутся. Так как заряд, чтобы начать излучать электромагнитные волны, должен приобрести ускорение (см. главу 13), без движения не может быть излучения электромагнитных волн.

Но когда 3p-электрон начинает переход с 3p-орбитали на незанятую 3s-орбиталь, его квантовая волна начинает меняться во времени. Во время перехода волна ритмично движется взад-вперед, и заряд ускоряется вместе с ней. Атом начинает излучать электромагнитные волны. К моменту завершения перехода атом успевает испустить одну световую частицу — фотон красного света. Как и электрон, свет передвигается как волна, но ведет себя как частица, когда вы пытаетесь его локализовать. Во время поглощения или испускания атомом свет проявляет свою корпускулярную природу.

Мы уже видели, что нагретые до определенной температуры тела излучают свет, этот процесс называется тепловым свечением. Однако в данном случае атом неона излучает свет без нагревания — такой процесс называется люминесценцией. Люминесценция является результатом излучательного перехода — то есть перехода между двумя состояниями, в процессе которого испускается или поглощается фотон света. В нашем примере излучательного перехода испускается фотон, который уносит энергию, выделяющуюся при переходе возбужденного 3p-электрона атома неона на свободную 3s-орбиталь. Разность энергии между этими двумя состояниями определяет энергию фотонов, которая, в свою очередь, определяет частоту и цвет световой волны фотона.

В соответствии с представлениями квантовой физики, частота фотона пропорциональна его энергии. А именно, энергия фотона равна частоте его электромагнитной волны, умноженной на фундаментальную природную константу, известную как постоянная Планка. Это соотношение между энергией и частотой может быть записано как

$$\text{энергия} = \text{постоянная Планка} \times \text{частота}$$

(14.2.1).

Впервые ввел эту константу немецкий физик Макс Планк (1858–1947) в 1900 году для объяснения спектра теплового излучения. Постоянная Планка имеет измеренное значение  $6,626 \times 10^{-34}$  Дж·с. Мы с вами пока что столкнулись с постоянной Планка и уравнением 14.2.1 применительно к световым волнам, однако эти закономерности относятся ко всем квантовым волнам. Например, связь квантовой частоты электрона с его энергией также описывается уравнением 14.2.1.

Постоянная Планка настолько мала, что даже энергия фотона ультрафиолетового света с частотой  $10^{15}$  Гц равна всего  $6,626 \times 10^{-19}$  Дж. Таким образом, в обычном луче света содержится так много фотонов, что мы не можем ощутить их как частицы. Однако на молекулярном уровне энергия одного фотона ультрафиолетового света является вполне существенной величиной. Ее достаточно, чтобы повредить молекулы вашей кожи, вызвав солнечный ожог и способствуя появлению загара в качестве защитной реакции. Частоты рентгеновского излучения еще выше, и его обладающие большой энергией фотоны могут причинить молекулам еще более серьезный вред.

Атом неона может излучать фотоны, соответствующие разностям энергий только двух его состояний, что весьма ограничивает его световой спектр. Пренебрегая деталями ядерной структуры, которые мы обсудим в главе 16, будем считать, что все атомы неона идентичны и излучают одинаковый характеристический световой спектр. В видимой области этого спектра преобладает теплос красное излучение фотонов, испускаемых при электронном переходе с 3р-орбитали на 3s-орбиталь, — вот почему неоновая вывеска светится красным.

Поскольку атомы различных элементов отличаются специфическим количеством электронов и различными состояниями, атом каждого элемента в возбужденном состоянии излучает свой собственный уникальный спектр световых волн. Для меди характерен сине-зеленый спектр, для стронция — темно-красный, для натрия — яркий желто-оранжевый. Астрономы, химики и инженеры используют спектры излучения для получения информации и практического применения. В том числе, как мы скоро увидим, и для освещения.

## Люминесцентные лампы

Если неоновые трубки подходят вам для освещения, вы, вероятно, сильно отличаетесь от окружающих. Большинство людей предпочитает газоразрядные лампы, более удачно имитирующие солнечный свет. Но если говорить об энергоэффективности источников искусственного солнечного света, то здесь трудно превзойти люминесцентные лампы.

Основа люминесцентной лампы — узкая стеклянная трубка, наполненная газами: аргоном, неоном и/или криптоном, плотность и давление смеси которых составляет примерно 0,3% атмосферных плотности и давления. Трубка также содержит несколько капель жидкой металлической ртути, часть которой испаряется с образованием паров ртути. Внутри трубки один атом газообразной ртути приходится примерно на тысячу атомов остальных газов, но именно атомам ртути мы обязаны тем, что видим свет.

Как и неоновая трубка, люминесцентная лампа для производства света использует газовый разряд. И хотя иногда для получения разряда используются высокие напряжения, большинство люминесцентных ламп работает на бытовых напряжениях, поэтому приходится прибегать к особым приемам для обеспечения проводимости газов. В лампах низкого напряжения электроды обычно нагреваются настолько, чтобы под действием тепловой энергии электроны перешли с поверхности электрода в газ. Однако независимо от того, каким образом инициирован разряд, в результате ток течет через газ и происходит излучение света.

Но и у люминесцентных ламп есть свои сложности. При разряде большая часть света испускается атомами ртути, но проблема в том, что этот свет почти полностью ультрафиолетовый. На стадии последнего излучательного перехода, который возвращает каждый атом ртути в основное состояние (6р → 6s), высвобождается много энергии и испускается фотон с длиной волны 254 нм. Этот свет не может пройти через стеклянные стенки трубки, и даже если бы смог, мы все равно его не увидели бы. Поэтому люминесцентная лампа преобразует ультрафиолетовый свет в видимый, используя порошок люминофора, нанесенный изнутри на стенки трубки.

Люминофоры — твердые вещества, которые излучают свет, когда им передается энергия. Их поведение аналогично поведению атома: передача энергии сме-



щает люминофор из основного состояния в возбужденное, и затем, претерпев ряд переходов, люминофор возвращается в основное состояние. Некоторые из этих переходов относятся к излучательным и производят свет.

В люминесцентной лампе люминофор возбуждается ультрафиолетовым светом. Это возбуждение, или передача энергии, тоже является излучательным переходом, в процессе которого фотон поглощается люминофором и один из его электронов совершает переход с более низкого энергетического уровня на более высокий. При этом электрическое поле света заставляет электронную волну ритмично колебаться, пока электрон не окажется на новом уровне. Фотон поглощается, люминофор получает энергию.

Когда люминофор приходит в возбужденное состояние, его электроны начинают возвращаться к своим основным состояниям. В большинстве из этих переходов происходит излучение видимого света, того, который вы видите, когда смотрите на лампу. Тем не менее некоторые из переходов вызывают невидимое инфракрасное излучение или бесполезные колебания внутри люминофора. Несмотря на эти потери энергии, люминофоры довольно эффективно преобразуют ультрафиолетовый свет в видимый. Этот процесс называется флуоресценцией.

В люминесцентных лампах используется тщательно подобранная смесь люминофоров, которая излучает свет в широком диапазоне длин волн. И хотя спектр этого излучения не совпадает с солнечным, нам оно кажется белым, потому что примерно в равной степени действует на красные, зеленые и синие глазные рецепторы. Смешивание люминофоров — необходимость: дело в том, что, как и атомы, каждый люминофор имеет свой характерный спектр излучения, который определяется разностью энергий между различными уровнями. Чтобы получить правильный баланс между красным, зеленым и синим излучением, нужно смешать несколько разных люминофоров. Хотя в некоторых рекламных и декоративных лампах используются ярко окрашенные несмешанные люминофоры, в осветительных люминесцентных лампах используется шесть стандартных цветовых смесей: холодный белый, холодный белый де-люкс, теплый белый, теплый белый де-люкс, нейтральный белый и дневного света.

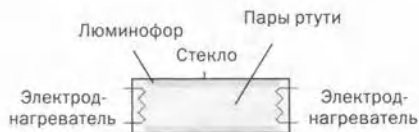
Первыми появились лампы дневного света. В их свете было слишком много синего, из-за чего все выглядело, как в операционной. С годами технология получения люминофоров совершенствовалась, и теперь наиболее распространенные лампы, холодные белые и теплые белые, дают свет гораздо более приятных оттенков. Свет от “холодных” люминофоров напоминает дневной, от “теплых” — свет обычных ламп накаливания. Часто употребляемые в жилых помещениях варианты ламп де-люкс дают еще более приятный для глаз свет, но они не так энергоэффективны.

## Несколько практических замечаний

Чтобы разгонять электроны, люминесцентной лампе нужно значительное электрическое поле. Так как это поле пропорционально падению напряжения в трубке, чем длиннее трубка, тем выше должно быть напряжение. Напряжение обычных линий электропередачи (от 110 до 240 В) подходит для трубок длиной до 3 м (10 футов), но для более длинных и цветных люминесцентных ламп, которые применяются в вывесках, рекламе, шоу-бизнесе, требуются гораздо более высокие напряжения.

Чтобы помешать электронам толкать друг друга к стенкам трубки, люминесцентные лампы должны содержать положительно заряженные ионы ртути. При особо энергичных соударениях во время разряда эти ионы возникают естественным образом. В результате образуется газоподобная смесь из положительно заряженных ионов и отрицательно заряженных электронов, которая называется плазмой. Плазма отличается от газа тем, что ее заряженные частицы взаимодействуют (притягивают или отталкивают друг друга) на значительных расстояниях. Все работающие газоразрядные лампы содержат плазму, в том числе неоновые трубки, которые мы рассматривали выше.

Чтобы образовалась плазма, обычная люминесцентная лампа должна докрасна раскалить электроды, для чего ток нагрева пропускают через нити накаливания на обоих концах трубки (рис. 14.2.5). Когда возникает газовый разряд, ток



**Рис. 14.2.5.** В люминесцентной трубке с разогреваемыми электродами электроды фактически представляют собой нити накаливания, которые нагреваются пропусканием через них электрического тока.

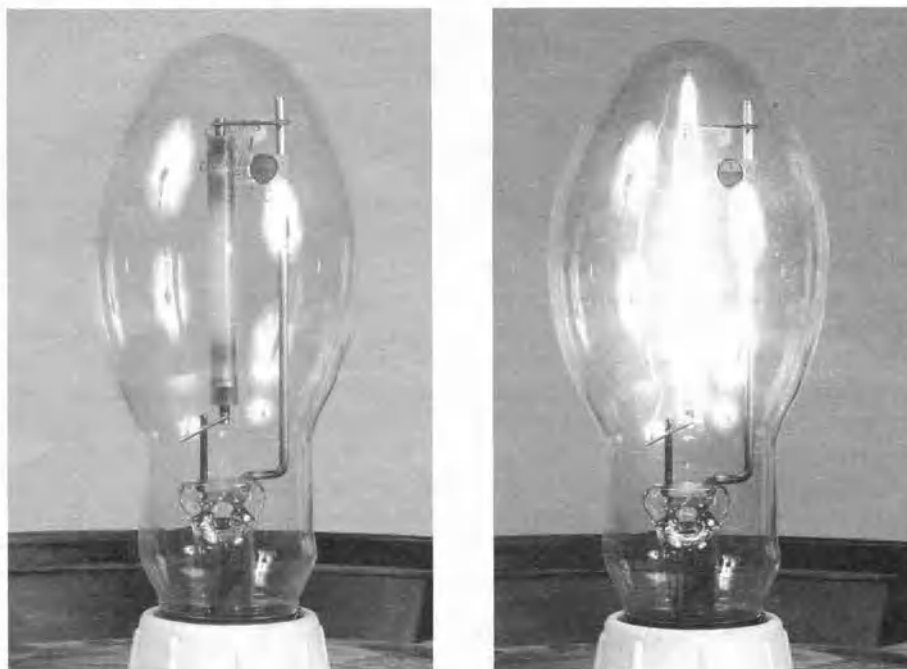
нагрева обычно можно отключить, поскольку электроды будут оставаться горячими благодаря электронам, сталкивающимися с ними при разряде. Однако бывают люминесцентные светильники с регулируемой яркостью, в этом случае нагрев электронов сам по себе не будет поддерживать плазму. В светильниках с регулируемой яркостью нужно, чтобы через нити-электроды постоянно пропускались токи нагрева.

К сожалению, нити-электроды непрочны. Они повреждаются в процессе так называемого распыления, когда положительные ионы ртути из плазмы сталкиваются с нитью-электродом и постепенно выбивают из нее атомы вольфрама. Так как распыление наиболее интенсивно происходит во время включения, обычная электродная нить выходит из строя после нескольких тысяч запусков. Вот почему не стоит включать и выключать люминесцентную лампу чаще, чем раз в несколько минут.

## Ртутные, металлогалогенные и натриевые лампы

В то время как под действием ртутного разряда низкого давления излучается главным образом ультрафиолетовый свет, при ртутном разряде высокого давления излучается больше видимого света, чем ультрафиолетового. Это происходит потому, что ультрафиолетовый свет задерживается плотно упакованными атомами ртути и только видимый свет способен выйти из области разряда.

Известный как каналирование излучения, этот эффект объясняется тем, что атомы ртути поглощают и испускают фотоны с длиной волны 254 нм одинаково хорошо. Тот же излучательный переход, который заставляет атом ртути излучать фотон 254 нм ( $6p \rightarrow 6s$ ), может работать и в обратном направлении, поглощая фотон ( $6s \rightarrow 6p$ ). В плотном ртутном газе, когда один атом ртути испускает фотон 254 нм, другой атом ртути тут же его поглощает. Таким образом, хотя разряд продолжает «вливать» энергию в атомы ртути, они не могут избавиться от нее испусканием фотонов с длиной волны 254 нм. Вместо этого они освобождаются от большей части своей энергии при помощи излучательных переходов между другими возбужденными состояниями. Поскольку захват этого света другими атомами ртути гораздо менее вероятен, он выходит из лампы в виде голубоватого видимого света.



**Рис. 14.2.6.** Активный компонент натриевой лампы высокого давления — небольшая полупрозрачная трубка. При нагревании лампы металлический натрий в трубке испаряется с образованием яркого желтого разряда. Плотный пар атомов натрия в трубке поглощает свет с длиной волны 590 нм, так что по сравнению с натриевыми лампами низкого давления такие лампы излучают более разнообразный и менее монохромный спектр длин волн.

Перед первым включением ртутной лампы высокого давления большая часть ртути в ней представляет собой жидкость, поэтому давление внутри лампы низкое. Начало работы такой лампы похоже на включение маленькой люминесцентной лампы без люминофора, поэтому вначале вы почти не видите света. Но трубка спроектирована так, что она нагревается во время работы и жидкая ртуть испаряется с образованием плотного газа. По мере повышения давления газа цвет трубки меняется, пока наконец она не начинает излучать яркий голубовато-белый свет.

Чтобы уменьшить голубой оттенок света, в некоторые ртутные лампы высокого давления добавляют атомы других металлов, главным образом в виде металлоидных соединений, что превращает их в металлогалогенные лампы. Йодиды натрия, таллия, индия и скандия добавляют свои спектры излучения к выходящему свету, усиливая красную область спектра. Благодаря им металлогалогенные лампы дают более приятное теплое свечение по сравнению с чисто ртутными.

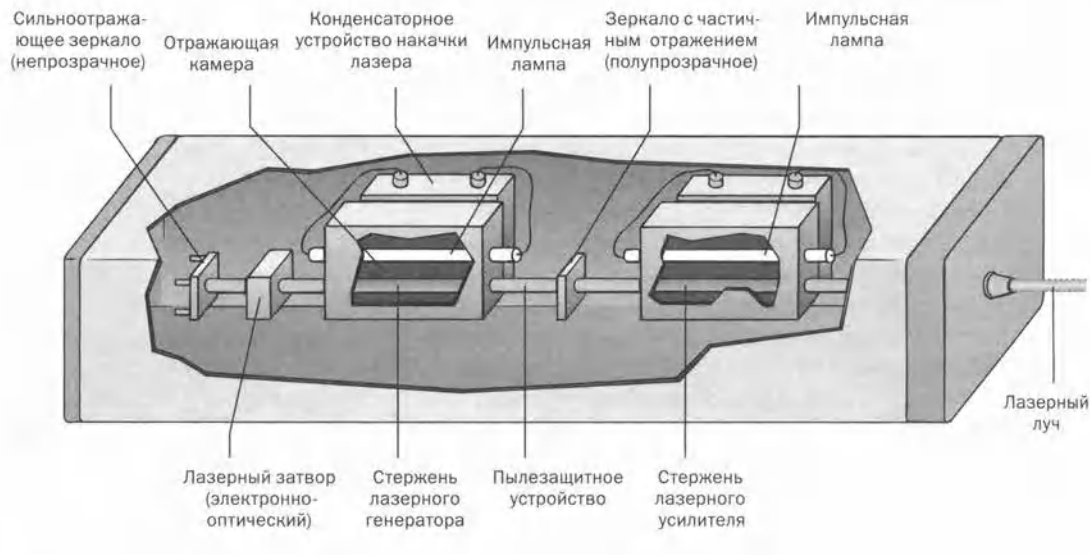
Чисто натриевые лампы напоминают ртутные, с той разницей, что вместо ртути используется натрий. При комнатной температуре натрий — твердое вещество, поэтому натриевые лампы и высокого, и низкого давления должны как следует разогреться перед тем, как выйти на стабильный режим работы. Натриевые лампы низкого давления отличаются чрезвычайно низким энергопотреблением, поскольку их свет с длиной волны 590 нм излучается в результате самого сильного излучательного перехода атома натрия: от низшего возбужденного состояния к основному ( $3p \rightarrow 3s$ ). Натриевые лампы низкого давления, дающие желто-оранжевое свечение, часто устанавливают вдоль дорог.

Но это монохромное освещение неприятно для глаз и не дает возможности воспринимать цветовую гамму. Оно годится для скоростных дорог, но никак не для дома. Вот почему домой люди покупают натриевые лампы высокого давления (рис. 14.2.6).

Интересно, что при высоком давлении излучение с длиной волны 590 нм само перераспределяется и в конечном итоге охватывает широкий диапазон длин волн, от желто-зеленого до оранжево-красного. Причина перераспределения в том, что из-за плотной упаковки атомов натрия часть столкновений, которые должны были стать источником излучения с длиной волны 590 нм, осуществляется не в полной мере. Эти столкновения искажают атомные орбитали, и в результате испускаются фотоны с измененными энергиями. Таким образом, натриевые лампы высокого давления натрия излучают на удивление мало света с длиной волны ровно 590 нм, так как атомы натрия, находящиеся в основном состоянии, поглощают этот свет; они осуществляют излучательный переход  $3p \rightarrow 3s$  в обратном направлении и поглощают фотоны ( $3s \rightarrow 3p$ ). Поглощение происходит настолько полно, что в излучательном спектре лампы на длине волны 590 нм даже наблюдается провал.

При использовании газоразрядных ламп высокого давления возникает проблема, которой с лампами низкого давления не существует: они с трудом включаются, когда они сильно нагреты. В газе высокого давления гораздо сложнее инициировать разряд, чем в газе низкого давления, поэтому все лампы начинают работу при низком давлении и лишь затем развивают высокое. Если разряд в металлогалогенной лампе, в натриевой или ртутной лампе высокого давления прерывается и теряет плазму, то перед повторным запуском лампа должна остыть.

---



## 14.3 Лазеры и светодиоды

### ВНИМАНИЕ!

#### ЛАЗЕРНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ОПАСНО.

Поскольку лазерный луч может быть чрезвычайно ярким и очень сильно сфокусированным, он представляет серьезную угрозу для глаз. При попадании в глаз луч сфокусируется на какой-то одной точке сетчатки и может нанести ей быстрое и необратимое поражение. Лазеры класса III и ниже считаются относительно безопасными для зрения, они рассчитаны на естественный мигательный рефлекс. Тем не менее ни на какой лазер нельзя смотреть прямо. Лазеры класса IV опасны для глаз, их свет ни при каких условиях не должен попадать вам в глаза!

❶ Может показаться, что фотон должен иметь одну точную длину волны и частоту и распространяться только в одном направлении, однако это не так. Фотоны путешествуют в виде электромагнитных волн и распространяются не в одном направлении. Поскольку каждый фотон имеет начало и конец, его волна содержит больше одной длины волны или одной частоты. Таким образом, в то время как лазеры могут производить самые совершенные электромагнитные волны, какие можно себе представить, эти волны все равно чуть-чуть расходятся и все равно обладают некоторым диапазоном длин волн и частот.

Мало найдется устройств, которые действовали бы на наше воображение так же, как лазеры. С момента их изобретения в конце 1950-х годов лазеры нашли множество способов применения, от резки металла и очистки кровяных артерий до топографических работ и воспроизведения компакт- и DVD-дисков. Но лазеры — это больше чем просто новый путь реализации старых идей. Лазеры объединили квантовую и оптическую физику для создания нового типа света. Этот свет принципиально отличается от того, который излучают лампы накаливания и люминесцентные лампы; благодаря своим свойствам он исключительно удобен для применения во многих областях. В этом разделе мы рассмотрим природу этого света и способы его получения.

### Лазеры и лазерное излучение

Чтобы разобраться, что такое лазер, нужно сначала понять, чем лазерное излучение отличается от обычного света, испускаемого горячими предметами или отдельными атомами при электрическом разряде. Каждая частица обычного света, то есть фотон, испускается самопроизвольно и независимо от других частиц света, излучаемых поблизости. За независимый и непредсказуемый характер этот свет и создающее его излучение назвали спонтанными, или самопроизвольными.

Однако еще в 20–30-х годах прошлого века Альберт Эйнштейн и другие ученые в своих теоретических работах предсказали существование иного типа света — индуцированного или вынужденного, излучения, которое создается, когда возбужденный атом или атомоподобная система дублирует проходящий фотон. Правда, это вынужденное излучение может происходить только в том случае, когда возбужденный атом способен самопроизвольно испускать точную копию фотона, настолько совершенную, что два эти фотона абсолютно неразличимы. Вместе они образуют единую электромагнитную волну.

Чтобы получить более полное представление о том, как происходит вынужденное излучение, представьте себе изолированный атом в возбужденном состоянии. Рано или поздно он должен вернуться в основное состояние, но чтобы это произошло, ему нужно испустить один или несколько фотонов. Прежде чем начать самопроизвольный излучательный переход, атом проводит какое-то время в возбужденном состоянии. Во время перехода один из его электронов совершает колебания, и атом испускает фотон.

Но если, пока атом находится в возбужденном состоянии, через него проходит идентичный фотон, его электрическое поле может индуцировать процесс излучательного перехода путем возбуждения ответных резонансных колебаний. Поле действует на электроны атома, заставляя их колебаться. И хотя это воздей-

стве невелико, его может оказаться достаточно, чтобы вызвать испускание света. Если атом под действием электрического поля индуцирующего фотона излучает свет, то испускаемый им фотон будет точной копией индуцирующего фотона.

Открыв явление вынужденного излучения, ученые сразу же поняли, что его можно использовать для усиления света. Если собрать вместе достаточное количество возбужденных систем, один проходящий фотон можно копировать снова и снова. И вскоре вместо одной частицы света у вас будут тысячи, миллионы или даже триллионы абсолютно одинаковых световых частиц.

Правда, реализации этой идеи пришлось ждать до конца 1950-х, когда была разработана технология, позволяющая на практике достичь усиления света. В 1960 году были построены первые лазерные генераторы. Эти устройства испускали мощные пучки света, в которых все частицы света были полностью идентичны. Процесс вынужденного излучения позволил воспроизвести одну световую частицу в бесчисленном количестве копий.

При самопроизвольном излучении света отдельными атомами или атомоподобными системами частицы света распространяются независимо в виде отдельных электромагнитных волн (рис. 14.3.1, а). Свет, состоящий из множества независимых электромагнитных волн, называется некогерентным.

Но когда та же совокупность возбужденных атомов или атомоподобных систем испускает свет при вынужденном излучении, все световые частицы оказываются абсолютно идентичными и образуют единую электромагнитную волну (рис. 14.3.1, б). В отличие от электронов, относящихся к фермионам (частицам Ферми) и потому подчиняющихся принципу Паули, множество идентичных фотонов являются одинаковыми квантовыми волнами, потому что фотоны относятся к бозонам (частицам Бозе) и, соответственно, не подчиняются этому принципу.

Свет, состоящий из множества идентичных фотонов и представляющий собой одну электромагнитную волну, называется когерентным. Благодаря своей единой волновой природе, когерентный свет демонстрирует замечательные интерференционные эффекты. Их легко можно увидеть в лазерном излучении.

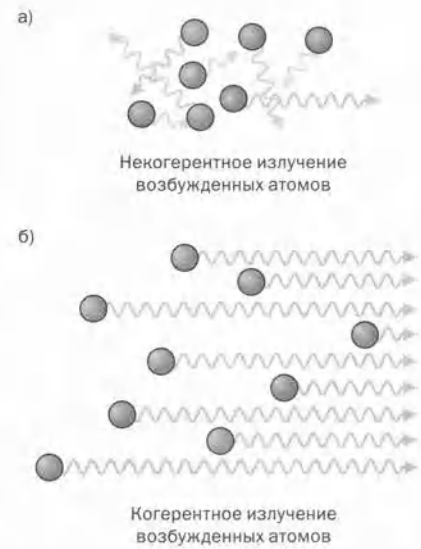


Рис. 14.3.1. (а) Фотоны некогерентного света создаются независимо друг от друга и имеют различные длины волн и направления движения. (б) Фотоны когерентного света являются продуктом вынужденного излучения, они полностью идентичны друг другу.

## Усилители света и колебания

Чтобы получить когерентный свет, необходимо усиление. Нужно начать с одной-единственной частицы света и дублировать ее множество раз. Основным инструментом для этого является лазерный усилитель (рис. 14.3.2). Когда слабый свет входит в область, содержащую совокупность атомов или атомоподобных частиц в возбужденном состоянии, — такая область называется активной средой, — этот свет усиливается и становится ярче. Новый свет имеет точно такие же характеристики, что и исходный, но содержит больше фотонов.

Тем не менее, думая о лазерах, мы редко представляем себе устройство, которое дублирует фотоны, пришедшие откуда-то извне. Обычно мы полагаем, что оно создает свет исключительно собственными силами. Но для этого лазер должен произвести начальную частицу света, которую он затем будет копировать. Лазерный генератор представляет собой устройство, которое использует саму активную среду для производства первого, “зародышевого” или индуцирующего, фотона и затем воспроизводит его множество раз (рис. 14.3.3). Если активную среду поместить между парой специально разработанных зеркал, то процесс вынужденного излучения может сам себя инициировать и поддерживать. Зеркала должны быть особым образом изогнуты и обладать определенной отражающей способностью. Одно зеркало, как правило, должно быть полностью отражающим, то есть непрозрачным, а другое должно пропускать небольшую часть света, попадающего на его поверхность, то есть быть полупрозрачным.

При размещении активной среды между двумя зеркалами велика вероятность того, что фотон, выпущенный спонтанно одной из возбужденных систем, отразится от зеркала и вернется в активную среду. Когда возвращающийся фотон проходит через активную среду, он усиливается. Поскольку фотон испускается одной из возбужденных систем, у него как раз такая длина волны, чтобы его могли усилить другие возбужденные системы. (Обсуждение свойств фотона — см. 1.)

К моменту выхода исходного фотона из активной среды он оказывается воспроизведен уже множество раз. Эта группа идентичных фотонов затем отражает-



Рис. 14.3.2. Для увеличения количества частиц света, выходящих из активной среды, лазерный усилитель использует возбужденные атомы или атомоподобные системы. Входящий свет дублируется при помощи вынужденного излучения.



Рис. 14.3.3. Лазерный генератор представляет собой лазерный усилитель, помещенный между двумя зеркалами. Колебания возникают, когда активная среда самопроизвольно испускает один фотон в нужном направлении. Этот фотон, отражаясь в зеркалах, многократно дублируется. Делая одно из зеркал полупрозрачным, часть света удаляют из лазера.

❶ Полупрозрачные зеркала часто используются для наблюдения, потому что в определенных условиях они кажутся обычными зеркалами. Если те, за кем следят, находятся в ярко освещенном помещении, а те, кто следит, — в затемненном, то первые будут видеть в основном свои отражения в зеркале и практически не будут видеть наблюдателей. Если же наблюдатели ярко освещены, то и объекты слежки смогут их ясно разглядеть. В фильмах обычно показывают, будто такие зеркала действительно прозрачны только в одном направлении, но это совсем не так. Наблюдатели должны следить за освещением, иначе они становятся видимыми для объектов наблюдения. Но и объекты также могут сделать наблюдателей видимыми, если направят через полупрозрачное зеркало сильный яркий свет. Например, если они приставят фотоаппарат со вспышкой вплотную к зеркалу, то смогут даже сделать снимок через стекло!

ся от второго зеркала и возвращается для очередного прохождения через активную среду. Она путешествует туда и обратно между зеркалами, пока количество идентичных фотонов в группе не становится астрономическим.

Наконец наступает момент, когда в лазере становится так много идентичных фотонов, что активная среда уже не в состоянии их усиливать. Дело в том, что в активной среде содержится определенный запас энергии и определенное количество возбужденных систем. Если активная среда будет получать извне дополнительную энергию, свет еще какое-то время будет усиливаться. Но если активная среда перестанет получать энергию, усиление света в конце концов прекратится.

Чтобы выпустить свет из лазерного генератора, одно из зеркал, как правило, делают полупрозрачным, то есть некоторые из фотонов, попадающих на поверхность зеркала, не отражаются, а проходят через него. Между прочим, двустороннее стекло, которое используют для слежки и наблюдения, на самом деле представляет собой полупрозрачное зеркало (подробнее см. ❷). При прохождении через зеркало создается луч исходящего света, лазерный луч. Лазерный луч продолжает выходить из зеркала до тех пор, пока его поддерживает процесс усиления фотонов. Поскольку лазерный луч состоит из копий одного исходного фотона, он является когерентным. По техническим причинам многие лазеры дублируют одновременно более одного исходного фотона, так что их излучение не вполне когерентно. Тем не менее при соответствующей тонкой настройке можно получить лазерный луч, в котором доминирует один исходный фотон.

Если сфокусировать линзой луч фонарика, независимые фотоны не попадут все вместе в фокус линзы. Дело в том, что, во-первых, при выходе из фонарика фотоны движутся все-таки в несколько различающихся направлениях, а во-вторых, из-за достаточно широкого диапазона их длин волн в линзе возникает дисперсия. Зато в лазерном луче, где практически все фотоны идентичны, они могут все вместе сфокусироваться на совсем маленьком участке, почти что в одной точке. Вот почему так эффективны лазерные принтеры: лазерный луч может освещать очень маленький участок на фотобарабане, который используется для получения печатных изображений.

## Как работает активная среда лазера

Ключевым вопросом лазерной технологии является получение возбужденных систем, необходимых для усиления света. В теории рассматривается четыре различных состояния атомов или атомоподобных систем: основное состояние, возбужденное состояние, верхнее лазерное состояние, нижнее лазерное состояние. Последние два еще иногда называют соответственно верхним/нижним состоянием лазерного перехода либо верхним/нижним лазерными уровнями. Сейчас станет понятно, почему выделяют именно эти четыре состояния.

Рассмотрим атом, который выступает в качестве идеального лазерного усилителя (рис. 14.3.4). Вначале атом находится в основном состоянии. Взаимодействие с фотоном или поглощение последнего переводит атом в возбужденное состояние, сообщая ему энергию, необходимую для усиления света. Затем атом переходит в верхнее лазерное состояние, либо испуская фотон, либо в результате столкновения. Этот предварительный сдвиг важен, потому что он не дает возбужденному атому вернуться обратно в основное состояние и таким образом избежать процесса усиления. Перейдя в верхнее лазерное состояние, атом задерживается там достаточно долго, чтобы усиливать свет.

Когда через атом проходит подходящий фотон, он стимулирует испускание дубликата фотона, и атом совершает излучательный переход в нижнее лазерное состояние. Пока все идет хорошо. Однако, если атом останется в нижнем лазерном состоянии, он может поглотить фотон лазерного света и вернуться в верхнее лазерное состояние. Чтобы избежать поглощения излучения, атом должен быстро перейти в основное состояние, либо испуская фотон, либо в результате другого столкновения. После этого атом готов начать цикл заново.

Такой цикл из четырех состояний или что-то близкое к нему наблюдается почти во всех лазерах. Цикл помогает лазеру поддерживать инверсию населенности между верхним и нижним лазерными состояниями, то есть положение, когда на верхнем уровне имеется больше атомов, готовых испускать лазерное излуче-



Рис. 14.3.4. В процессе работы лазера идеальная лазерная система проходит через четыре различных состояния.

ние, чем на нижнем уровне — атомов, готовых поглощать лазерное излучение. Поддержание инверсной населенности имеет решающее значение для лазерного усиления, потому что без этого активная среда больше поглощает, чем усиливает свет, и нельзя наращивать интенсивность света.

В любом лазере должен быть какой-то источник энергии, необходимой для перевода атомов или атомоподобных систем в активной среде из основного состояния в возбужденное для создания и поддержания инверсии. Процесс передачи энергии в активную среду, который должен подготовить ее для усиления света, называется накачкой. Способы накачки различаются в зависимости от типов лазера.

Наиболее распространенные системы накачки — электронная и оптическая. В процессах электронной накачки потоки заряженных частиц используют свою кинетическую или электростатическую энергию для возбуждения атомов или атомоподобных систем активной среды. При оптической накачке на активную среду воздействует интенсивное излучение, что также вызывает переход из основного состояния в возбужденное.

Важнейшим примером оптической накачки являются ионно-легируемые твердотельные лазеры. В основе их работы — внедрение (легирование) атомарных ионов в прозрачные твердые тела. Обычно в качестве таких ионов выступают титан (Ti), неодим (Nd) и эрбий (Er), которыми легируют сапфир, алюмо-иттриевый гранат (АИГ, или YAG) или стекло. Титан-сапфировые, неодим-АИГ и эрбий-волоконные лазеры играют большую роль в современных исследованиях, технологиях и системах оптической связи. Когда на эти активные среды действует чрезвычайно яркий свет, их ионы переходят в возбужденное состояние и могут действовать как лазерные генераторы или усилители (рис. 14.3.5 и 14.3.6).

## Лазеры с переменной длиной волны и с высокой интенсивностью излучения

Некоторые активные среды имеют много верхних и нижних лазерных состояний и могут излучать вынужденный свет определенного диапазона длин волн. Установив цветной светофильтр в лазере с такой активной средой, можно получить лазер с переменной длиной волны. Цветной фильтр определяет, световые волны какой длины могут отражаться между зеркалами, и лазер излучает свет только с этой длиной волны (рис. 14.3.7).

Если цвет фильтра регулируется, то есть можно выбирать длину световой волны, которую он будет пропускать, то и длина волны лазерного излучения будет меняться в зависимости от настройки цветного светофильтра. Такие лазеры с регулируемой длиной волны часто применяют в научных исследованиях и в медицине, где свет с определенной длиной волны может быть использован для контроля химических или физических изменений атомов, молекул или материалов.



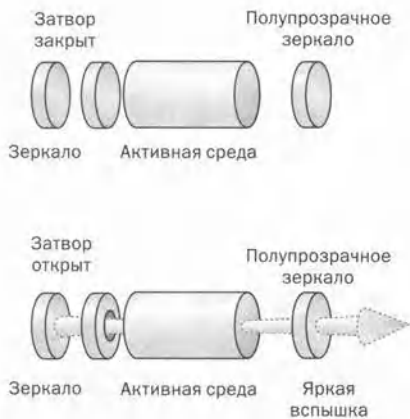
Рис. 14.3.5. Лазерный усилитель с ламповой накачкой содержит фиолетовый алюмо-иттриевый, легированный неодимом (Nd:YAG) стержень. Защищенный стеклянной трубкой стержень расположен в нижней части открытого блока усилителя, стенки которого покрыты золотом. Свет от длинной импульсной лампы в верхней части коробки переводит ионы неодима в возбужденное состояние, в результате чего они могут усиливать инфракрасный свет, горизонтально проходящий через стержень.



Рис. 14.3.6. В лазере с оптической накачкой интенсивный свет от импульсной лампы, дуговой лампы или даже другого лазера передает энергию активной среде. Атомы или атомоподобные системы внутри активной среды хранят эту энергию и используют ее для усиления света.



Рис. 14.3.7. Некоторые активные среды могут усиливать свет разных длин волн. После установки между зеркалами цветного светофильтра лазерный генератор испускает свет только определенной длины волны.



**Рис. 14.3.8.** Установка между зеркалами затвора позволяет лазерному генератору запасать энергию в активной среде. Когда затвор открывается, вся запасенная энергия мгновенно превращается в свет и образуется гигантский лазерный импульс.

Лазеры с высокой интенсивностью излучения временно удерживают “зародышевые” фотоны от проникновения в активную среду. При отсутствии иницирующих фотонов для усиления атомы или атомopodobные системы в активной среде будут оставаться в верхних лазерных состояниях относительно долго. Такая способность накапливать энергию и ждать позволяет лазеру испускать чрезвычайно интенсивные вспышки света.

Помимо двух зеркал по обе стороны активной среды, у таких лазеров имеется затвор (**рис. 14.3.8**). Затвор блокирует свет, который иначе отражался бы от одного из зеркал. Поскольку при закрытом затворе свет не может проходить через активную среду, лазер не испускает свет, и в активной среде постепенно накапливается энергия. Когда затвор открывается, свет начинает перемещаться взад-вперед между двумя зеркалами, при этом лавинообразно усиливаясь. Лазер излучает яркую вспышку света. Затвор, как правило, представляет собой электрооптическое устройство, которое использует электрические свойства вещества для контроля светопропускания.

В некоторых лазерах с электрическим управлением вспышка света, которая происходит при открытии затвора, длится всего нескольких миллиардных долей секунды. Но свет, излучаемый за этот короткий период, ярче, чем все вместе взятые огни города средних размеров. Еще более сложно устроенные короткоимпульсные лазеры могут производить вспышки света, которые продолжаются несколько квадриллионных долей секунды ( $10^{-15}$  с), но по яркости превосходят любой другой свет на земле.

## Светодиоды и лазерные диоды

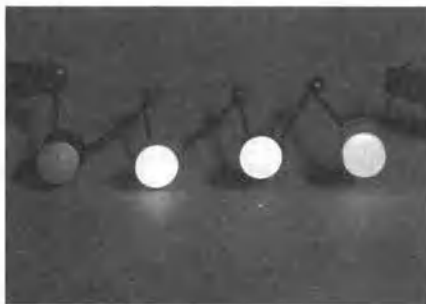
Наиболее распространенными лазерами с электронной накачкой являются диодные. Применяемые в лазерных указках, устройствах для считывания штрихкодов, принтерах, компакт-дисках и DVD-плеерах, эти лазеры имеют прямое отношение к светоизлучающим диодам, которые, в свою очередь, напоминают обычные диоды, те, что мы обсуждали в разделе 12.1. Но тогда как обычные диоды предназначены для того, чтобы регулировать прохождение тока, затрачивая как можно меньше энергии, лазерные и светоизлучающие диоды еще и производят свет.

В диодах с прямым смещением, где ток течет от анода к катоду, электроны с уровней проводимости катодов n-типа совершают p-n-переход и становятся электронами уровня проводимости в аноде p-типа. В сущности, мы можем рассматривать анод как находящийся в возбужденном состоянии: у него есть электроны на уровне проводимости и незанятые валентные уровни.

Что происходит дальше, зависит от свойств диода. В обычном кремниевом диоде эти электроны переходят с уровня проводимости на незанятые валентные уровни без испускания заметного света. Зонная структура кремния обладает свойствами, которые препятствуют излучению света, так что большая часть этих электронных переходов производят внутренние колебания, но не свет.

Но специализированные диоды изготавливают из особых видов полупроводников, в которых электроны уровня проводимости в аноде p-типа часто подвергаются излучательным переходам на незанятые валентные уровни и при этом излучают свет. Содержащие в основном соединения галлия, индия, алюминия, мышьяка, фосфора и азот в различных сочетаниях, они известны как светоизлучающие диоды, или светодиоды. Современные светодиоды могут испускать практически любой свет, включая инфракрасный, красный, оранжевый, желтый, зеленый, синий, фиолетовый, а также ультрафиолетовый (**рис. 14.3.9**). Существуют также белые светодиоды, правда, на самом деле это фиолетовые или ультрафиолетовые светодиоды с люминофорным покрытием, которое дает белый свет.

Цвет светодиода напрямую зависит от энергии, выделяющейся при переходе электрона в аноде p-типа с уровня проводимости на валентный уровень. Наиболее удобной единицей для измерения этой энергии служит электронвольт (сокращенно эВ) — энергия, выделяющаяся, когда частица, обладающая единичным электрическим зарядом, испытывает падение напряжения на 1 (1 эВ равен  $1,6021 \times 10^{-19}$  Дж). В обычном красном светодиоде при переходе с уровня проводимости на валентный уровень электрон выделяет 1,9 эВ и может испустить фотон с энергией 1,9 эВ. Поскольку энергия и частота связаны уравнением 14.2.1, а частота



**Рис. 14.3.9.** Эти светодиоды соединены последовательно, так что через них последовательно протекает один и тот же ток. В то же время, вследствие различной ширины запрещенных зон, они излучают свет разных цветов. Слева направо: красный, оранжевый, зеленый и синий.



и длина волны — уравнением 9.2.1, следовательно, фотон с энергией 1,9 эВ характеризуется частотой  $4,6 \times 10^{14}$  Гц и длиной волны 650 нм.

Чтобы работать и производить фотоны с энергией 1,9 эВ, красный светодиод должен иметь прямое смещение с падением напряжения не менее 1,9 В. Токпроводящий диод использует это падение напряжения для перевода электронов в зону проводимости анода, где их энергия на 1,9 эВ выше, чем в валентной зоне. Многие из этих электронов в результате высвобождают свою избыточную энергию в виде фотона с энергией 1,9 эВ.

Чем меньше длина волны света, который излучает светодиод, тем больше энергии должен выделить каждый электрон при переходе с уровня проводимости на валентный уровень и тем шире должна быть запрещенная зона полупроводника. Фиолетовому светодиоду, который излучает свет с длиной волны 400 нм, чтобы испустить фотон с энергией 3,1 эВ, требуется запрещенная зона шириной около 3,1 эВ. Кроме того, этому светодиоду нужно прямое смещение напряжения свыше 3,1 В. То, что светодиоды, работающие ближе к фиолетовому краю спектра, нуждаются в большем падении напряжения, объясняет, почему им нужно более высокое напряжение источников питания.

К сожалению, в освещении помещения участвуют менее четверти от всех электронов, совершающих р-п-переход в светодиоде. Несмотря на то, что значительная часть этих электронов испускает фотоны, большинство фотонов поглощается полупроводником прежде, чем они успевают покинуть светодиод; излучательные переходы, которые испускают свет (уровень проводимости → валентный уровень), с таким же успехом его поглощают (валентный уровень → уровень проводимости). Тем не менее, несмотря на эти препятствия, по энергоэффективности производства видимого света современные светодиоды сопоставимы с люминесцентными лампами. Светодиоды становятся все эффективнее и долговечнее, и нет никаких сомнений в том, что они станут основной формой освещения, — это всего лишь вопрос времени.

Лазерный диод очень похож на светодиод, если не считать того, что лазерный диод использует излучательные переходы для усиления света. Так как усиление может происходить только при условии, что излучение света превышает поглощение, лазерный диод должен обеспечивать инверсию населенности между верхним и нижним лазерными состояниями.

Лазерный диод создает такую инверсию, концентрируя ток в очень узких р-п-переходах, выполненных из сильно легированных полупроводников. Сконцентрированный ток создает в зоне проводимости анода огромную плотность электронов. В зоне проводимости электроны быстро занимают уровни проводимости с наименьшей энергией — то есть верхнее лазерное состояние. Мощное легирование приводит к опустошению большинства валентных уровней анода с наиболее высокой энергией — то есть нижнего лазерного состояния. Имея много электронов в верхнем лазерном состоянии и мало — в нижнем, диод достигает инверсии населенности и может усиливать свет\*.

Большинство лазерных диодов действует как лазерные генераторы (рис. 14.3.10), усиливая собственное самопроизвольное излучение и добиваясь образования интенсивного когерентного луча. Края анода, как правило, имеют достаточно высокую отражательную способность, чтобы выполнять функцию зеркал. Таким образом образуется законченный лазерный генератор. Однако многие лазерные диоды имеют более сложное устройство и специальные покрытия, что позволяет концентрировать лазерное излучение в одном направлении и регулировать характеристики луча.

Как и в светодиодах, цвет и длина волны света лазерного диода зависят прежде всего от ширины запрещенной зоны его анода. Первыми были разработаны инфракрасные и красные лазерные диоды, которые быстро нашли применение в различных бытовых приборах. Разработка лазерных диодов с большей шириной запрещенной зоны и более короткими волнами оказалась долгим и трудным процессом. Тем не менее рабочая область лазерного диода в настоящее время распространяется и на ультрафиолетовую часть спектра, и по мере того как стоимость коротковолновых лазеров падает, а надежность растет, они начинают применяться в повседневной жизни.

\* Подчеркнем, что даже самая низшая энергия зоны проводимости остается большей, чем максимальная энергия валентной зоны.

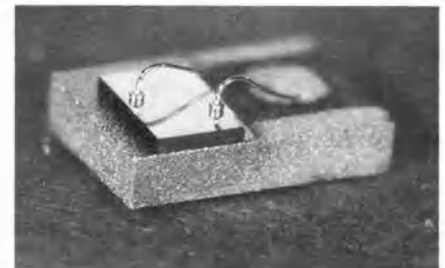


Рис. 14.3.10. Этот крошечный полупроводниковый чип — лазерный диод, который испускает интенсивный пучок когерентного света, когда через него протекает ток.

## 14.4 Краски и макияж

---

Значительную часть представлений о мире мы получаем при помощи глаз. Когда мы смотрим на предметы, мы видим, что они блестящие или тусклые, яркие или темные, цветные или серые. На самом деле, во многих случаях то, что мы видим, — это краска. Краски повсеместно используются для изменения внешнего вида вещей — в архитектуре, искусстве, различных товарах, упаковках, коммуникациях, продуктах питания — и даже людей. Кроме того, краски защищают предметы и изменяют их покрытия. Подобно краскам, макияж тоже придает иной вид объектам, только в этом случае объекты — это люди.

### Состав красок

---

Краски — это больше чем просто цвет, который мы наносим на поверхности. Это сложные покрытия, служащие самым разнообразным целям. Помимо окрашивания, краски защищают поверхности, меняют их форму и физические свойства. Сперва рассмотрим краски как покрытия, а затем перейдем к вопросу о цвете.

В составе большинства красок присутствует по меньшей мере четыре группы компонентов: связующие вещества, летучие вещества или растворители, пигменты и красители, добавки-наполнители.

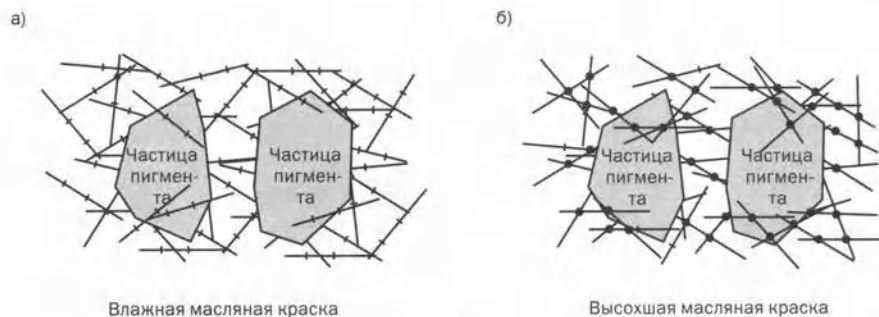
Связующие вещества придают краскам структуру. Они создают сплошное прочное покрытие, которое приклеивается к поверхности и надолго остается на ней. В большинстве случаев связующие вещества представляют собой полимеры — системы органических молекул, состоящие из длиннейших цепей, которые мы еще обсудим в разделе 17.3. Эти молекулы слепляются друг с другом, как остывшие макароны, и таким образом формируют жесткие материалы. В зависимости от вида краски, эти длинные молекулы либо уже присутствуют в ней до нанесения, либо образуются в процессе так называемого “высыхания” краски.

Растворители — это летучие вещества, которые поддерживают краски в жидком состоянии достаточно долго, чтобы их было удобно наносить, и которые затем легко испаряются во время высыхания. В некоторых случаях эти вещества и в самом деле действуют как растворители, переводя в раствор связующие вещества и другие компоненты, так что краска становится почти однородной жидкостью. Но другие, более современные краски содержат крошечные твердые частицы связующего вещества, которые распределены в среде растворителя во взвешенном состоянии (что означает, что частицы не оседают под действием силы тяжести). По мере испарения растворителя частицы связующего вещества образуют сплошное покрытие.

Пигменты представляют собой тонкоизмельченные нерастворимые порошки, которые придают покрытию цвет, непрозрачность и другие оптические свойства. Обычно частицы порошка также находятся в краске во взвешенном состоянии, а при высыхании (отверждении) захватываются молекулами связующих полимеров. Некоторые покрытия не содержат пигментов — например прозрачные лаки. Есть и такие покрытия, в которых пигменты не просто обеспечивают цвет, а выполняют гораздо более важные функции, — например, записи на магнитных носителях. Есть даже пигменты, в которых капсулы разрушаются и испускают ароматы и эфирные масла, если краску поскрести.



**Рис. 14.4.2.** (а) Во влажной краске молекулы масла (изображены в виде отрезков с черточками, обозначающими двойные связи) образуют жидкость, которая обволакивает частицы пигмента. (б) В высохшей краске молекулы масла соединяются друг с другом в местах разрыва двойных связей. Это очень упрощенное изображение — на самом деле, молекулы масла гораздо сложнее.



дает ему возможность соединиться еще только с двумя другими атомами. Обычно одним из них становится атом углерода, другим — водорода.

Поскольку в молекуле масла с двойными связями меньше атомов водорода, чем если бы в ней были только одинарные связи, такую молекулу называют ненасыщенной. Молекула масла (жира), которая содержит одну двойную связь в цепи атомов углерода, называется мононенасыщенной, содержащая более одной двойной связи — полиненасыщенной. Двойные связи влияют на форму молекул масла и затрудняют его затверждение. Ненасыщенные масла представляют собой жидкости даже при относительно низких температурах, поэтому они входят в состав растений из более умеренных регионов и холоднокровных животных, таких как рыбы. В целом, чем холоднее природная среда, в которой существует растение или холоднокровное животное, тем больше двойных связей в молекулах их жиров и масел.

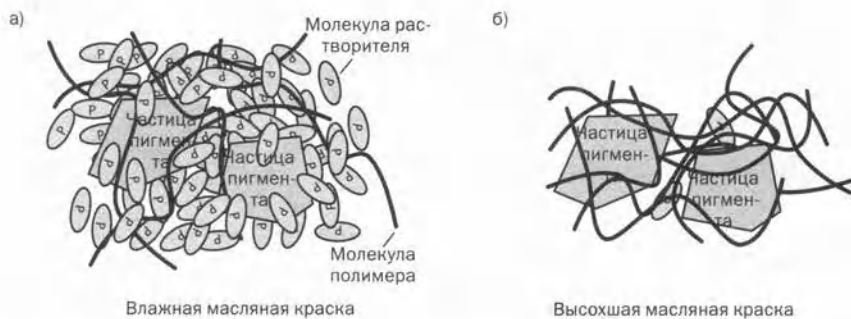
Двойные связи подвержены воздействию химических реагентов и могут связывать вместе ненасыщенные масляные молекулы. Когда фрагмент молекулы, так называемый свободный радикал, атакует двойную связь, связь становится одинарной. Свободный радикал образует связь с одним из атомов углерода и становится его четвертым партнером. Но другому атому углерода, бывшему участнику двойной связи, тоже нужно искать себе нового четвертого партнера. Если он соединится с атомом углерода другой молекулы масла, то прочно свяжет вместе две молекулы. Такой процесс перекрестного сшивания является формой полимеризации, и именно таким путем происходит отверждение олиф (**рис. 14.4.2**).

Олифы относятся к полиненасыщенным маслам. Наличие нескольких двойных связей позволяет каждой цепи образовывать связи с несколькими другими цепями и формировать сложные переплетенные сети. Самые лучшие олифы содержат в цепочке три и более двойных связей, максимально отделенных друг от друга. Классическая олифа — льняное масло, содержащее в большинстве своих цепочек три равномерно расположенные двойные связи. Льняное масло получают из льняного семени, которое когда-то было побочным продуктом производства льняной ткани. В наше время, когда постельное белье шьют из более современных тканей, лен выращивают главным образом ради содержащегося в его семенах масла.

В процессе сшивания участвует кислород, играющий ключевую роль в образовании свободных радикалов. Под воздействием воздуха олифа постепенно затвердевает и превращается в прочный, прозрачный и гибкий пластик. При отверждении химическая потенциальная энергия переходит в тепловую и олифа становится теплой. Разогревание олифы хотя и редко, но может привести к самопроизвольному возгоранию, если оставить пропитанные краской тряпки в небольшом ограниченном пространстве.

Обычно для затверждения чистой олифы требуется несколько недель или даже месяцев, однако добавление к краске различных соединений металлов может ускорить процесс. Некоторые металлы ускоряют процесс образования свободных радикалов и тем самым стимулируют сшивание. Атомы кобальта и марганца способствуют затверждению поверхности масла, атомы свинца и циркония отверждают внутренний слой. Однако из-за токсичности свинец больше не используют в качестве ускорителя высыхания.

Даже при добавлении металлов-осушителей требуется некоторое время, чтобы олифа начала твердеть. Олифа содержит небольшие количества антиоксидантов, которые вступают в реакцию со свободными радикалами и таким образом мешают их участию в отверждении. Эти антиоксиданты должны быть полностью связаны до того, как масло начнет затвердевать. Похожие антиоксиданты, напри-



**Рис. 14.4.3.** (а) Во влажной масляной краске частицы пигмента находятся во взвешенном состоянии в растворителе, содержащем несвязанные молекулы полимера. По мере высыхания краски растворитель испаряется. (б) В высохшей краске частицы пигмента и оставшиеся молекулы растворителя удерживаются переплетенной сетью молекул связующего полимера. Молекулы полимера могут приобрести некоторую подвижность только при температуре выше температуры стеклования.

мер витамин Е, замедляют аналогичные процессы перекрестной полимеризации у нас в организме и тем самым задерживают старение на молекулярном уровне.

Художественные масляные краски получают, смешивая пигменты с олифой. Олифа связывает частицы пигмента и удерживает их на холсте. При первом нанесении краска представляет собой густую жидкость, которой можно относительно легко манипулировать. Но по мере того как происходит процесс полимеризации, краска становится все гуще и гуще и в конце концов полностью затвердевает.

## Масляные краски для ремонта и строительства

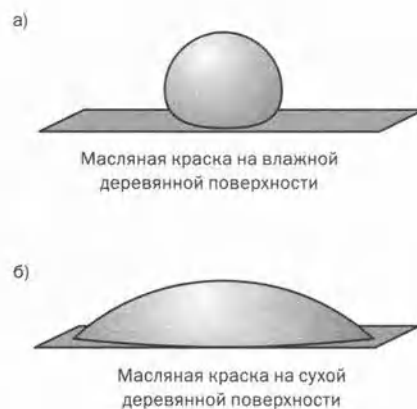
Маллярные масляные краски несколько отличаются от художественных. В большинстве их полимерные связующие содержатся в виде растворов в органических растворителях. Промышленно синтезированные молекулы полимеров плавают в жидком растворителе (рис. 14.4.3). Поскольку водорастворимые краски на стенах никому не нужны, полимерные красители в воде не растворяются, для них требуются особые химические растворители. Хотя растворителя нужно ровно столько, чтобы снизить вязкость и сделать краску пастообразной, его количество обычно все-таки превышает 25% от массы краски. После нанесения краски на поверхность молекулы растворителя испаряются, а оставшиеся молекулы полимера образуют тонкую пленку. По такому принципу работает большинство акриловых красок.

Чтобы полимер был растворим в определенном растворителе, его молекулы должны довольно активно взаимодействовать с молекулами растворителя. Кроме того, молекулы полимера не должны быть переплетены, чтобы растворитель мог их переносить. Но если молекулы полимерного связующего полностью растворяются в растворителе, с частицами пигмента в этих красках ничего подобного не происходит. Они остаются в твердом состоянии и имеют тенденцию оседать на дно стоящей на полке банки с краской. Вот почему перед использованием масляную краску обязательно нужно перемешать.

При нанесении краска должна размазываться по поверхности, а не собираться в капли (рис. 14.4.4). То есть краска должна смачивать поверхность. Для смачивания необходимо, чтобы молекулы жидкости с достаточной силой притягивались к молекулам поверхности и образовывали связи с ними, а не между собой. Не всякая жидкость может смочить любую поверхность. Например, вода не смачивает воск, а образует на нем капли, потому что молекулы воды не притягиваются к молекулам воска. Масляные краски смачивают большинство поверхностей, но для этого поверхности должны быть чистыми и сухими. Масляные краски не смачивают влажные поверхности, точно так же как краски на водной основе (латексные, о которых мы будем говорить ниже) не смачивают жирные поверхности. Иногда для того, чтобы помочь краске смочить поверхность и связать краску с поверхностью, используют предварительное покрытие — грунтовку.

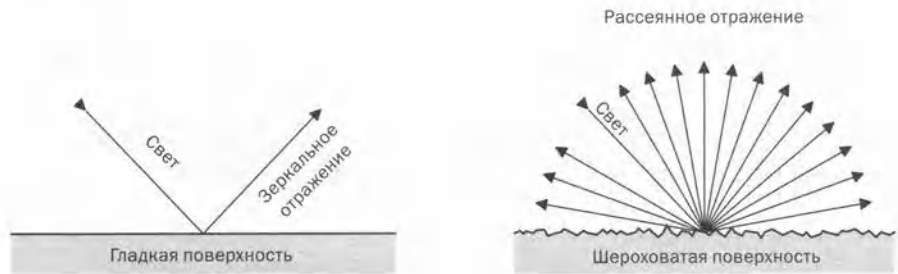
После нанесения краски растворитель начинает испаряться с ее поверхности. Вначале молекулы растворителя легко проходят между молекулами полимера и весь слой краски сохнет одновременно. Даже относительно крупные частицы пигмента свободно дрейфуют в жидкости. Но по мере испарения растворителя полимерные молекулы сближаются и вязкость краски увеличивается. Первыми перестают перемещаться частицы пигмента, затем молекулы полимера, и наконец застывает оставшийся растворитель. К этому моменту краска становится сухой на ощупь.

Такой процесс высыхания приводит к тому, что на поверхности краски образуется тонкий слой прозрачной полимерной пленки. При испарении раство-



**Рис. 14.4.4.** На влажной поверхности масляная краска собирается в капли (а), но большинство сухих и чистых поверхностей она смачивает (б).

Рис. 14.4.5. (а) Поверхности, которые в масштабе длины световой волны являются гладкими, дают зеркальное отражение. (б) Шероховатые поверхности создают рассеянное отражение и из-за этого кажутся тусклыми или матовыми.



ритель выносит полимерные молекулы на поверхность, не затрагивая крупные малоподвижные частицы пигмента. Даже после того, как частицы пигмента окончательно теряют подвижность, молекулы растворителя и полимера по-прежнему могут просачиваться между ними и таким образом создают на поверхности пленку из чистого полимера микронной толщины.

Именно эти гладкие и прозрачные участки поверхности придают глянец покрытиям из масляных красок. Большинство эмалевых красок обязаны своим глянцевым сиянием масляной основе. Когда в слой полимера из воздуха проникает свет, из-за рассогласования импеданса\* часть света отражается, а так как поверхность гладкая и плоская, возникает зеркальное отражение (рис. 14.4.5). Свет, падающий на такую поверхность в одном направлении, отражается тоже только в одном направлении.

Падая на поверхность с неровностями, по размеру сопоставимыми с длиной световой волны, свет рассеивается неравномерно и образует матовые отражения. Некоторые виды масляных красок специально делают “полуглянцевыми” или даже “матовыми”, добавляя в них тонкоизмельченный порошок диоксида кремния (кварцевого песка). Частицы кварца меньше, чем частицы пигмента, поэтому в процессе высыхания они перемещаются к поверхности красочного слоя, снижая гладкость поверхности и ослабляя (частично или полностью) зеркальность отражения. Примерно то же происходит, когда в результате старения или износа частицы пигмента начинают выступать над поверхностью и поверхность начинает казаться матовой.

Большинство масляных красок никогда не высыхает до конца без температурной обработки. Хотя на начальном этапе отверждения молекулы растворителя быстро диффундируют к поверхности и испаряются, затем краска становится все более вязкой и растворителю все труднее из нее выходить. В конце концов сшитое полимерное связующее становится настолько плотным, что даже крошечные молекулы растворителя не могут через него пробиться. На самом деле в краске, которая кажется высохшей, содержится значительное количество захваченного растворителя. Отдельные молекулы растворителя, которым время от времени удается вырваться, придают краске устойчивый запах.

Матрица, сшитая из переплетенных полимерных цепей, относится к стеклоподобным некристаллическим материалам (подробнее — в разделе 17.2). Чтобы удалить “застрявшие” в ней молекулы растворителя, слой краски должен быть нагрет так, чтобы молекулы в нем начали двигаться относительно друг друга. Когда эта температура — температура стеклования — превышена, молекулы приобретают мобильность, которая позволяет застрявшему растворителю выбраться наружу. Красящие материалы, так или иначе контактирующие с пищевыми продуктами, нужно подвергать тепловой обработке, чтобы удалить растворители.

Из-за своей жесткости и непроницаемости краски на масляной основе при применении для наружных работ, как правило, образуют пузыри и трещины. Вода проходит сквозь древесину и оказывается под слоем краски. Поскольку вода неспособна проникнуть сквозь краску и испариться, она может создавать пузыри, когда краска нагревается на солнце. Кроме того, изменения температуры и влажности заставляют дерево расширяться и сжиматься. Подвергаясь различным относительным расширениям-сжатиям, негибкая масляная краска может вспучиваться или трескаться.

Но в помещении масляные краски, напротив, очень долговечны. Благодаря твердости и жесткости такие покрытия легко мыть и чистить. Грязь оседает на поверхности краски и может быть удалена без повреждения полимера.

\* Правильнее: из-за различия показателей преломления.

Профессиональные маляры, которые не ленятся чистить свои щетки и другие принадлежности растворителями, как правило, для внутренних работ предпочитают краски на масляной основе. Любители, которые решили сделать ремонт своими руками, обычно выбирают латексные краски (о которых мы будем говорить ниже), считая их более простыми в использовании.

Многие масляные краски для строительных работ ведут себя так же, как олифа. По мере того как испаряется растворитель и в краску проникает кислород, происходит сшивание полимерных цепей. К этому типу относятся почти все алкидные краски. В процессе сшивания высвобождается множество крошечных фрагментов молекул, которые испаряются при высыхании краски и придают ей характерный запах.

В состав красок на масляной основе добавляют осушители или ускорители высыхания, задача которых — ускорить сшивание в местах разрыва двойных связей. К сожалению, главными осушителями до 1930-х годов служили соединения свинца. Так как из-за жесткости и непроницаемости эти краски не могут выдерживать изменения температуры и влажности, в конце концов они отслаиваются от дерева и представляют угрозу для здоровья, особенно детского. В современных красках на масляной основе используют относительно нетоксичные осушители.

Тем не менее даже в не содержащих свинца масляных красках еще присутствуют опасные для здоровья компоненты — растворители. Практически все летучие органические растворители токсичны. Учитывая, что масляные краски предполагают полное растворение нерастворимых в воде полимеров, кажется, нет никакого способа избежать применения органических растворителей. Поэтому художники и строители постепенно отказываются от масляных красок в пользу тех, которые не требуют полного растворения полимеров. В первую очередь это латексные краски.

## Малярные латексные краски

Малярные латексные краски не являются однородными жидкостями. Как и масляные, латексные краски содержат полимерные молекулы, но эти молекулы не образуют растворов. Вместо этого они входят в состав мельчайших твердых частиц и во взвешенном состоянии плавают в жидкой среде, в качестве которой обычно используется вода (рис. 14.4.6). Молекулы полимера нерастворимы в среде-носителе.

Может показаться, что такие частицы полимера никогда не смогут совместно образовать однородное покрытие, но на самом деле это возможно. После того как краска наносится на поверхность, вода испаряется и частицы полимера сближаются. По мере испарения вода прижимает молекулы друг к другу, и полимерные цепи начинают переплетаться. К тому моменту, когда вся вода уходит, молекулы

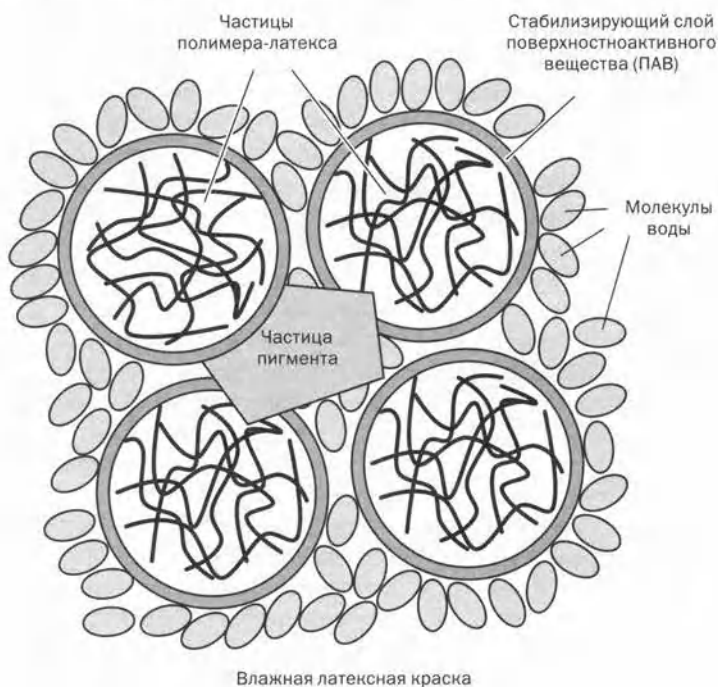


Рис. 14.4.6. Влажная латексная краска состоит из мелких шарообразных частиц, содержащих полимеры и покрытых слоем поверхностно-активного вещества. Частицы находятся во взвешенном состоянии и образуют водную эмульсию.

уже тесно переплетены. Они захватывают частицы пигмента и образуют слой, который иногда даже долговечнее, чем покрытие из масляной краски.

Технология производства латексов достаточно сложна. Полимерные частицы при хранении должны оставаться в банке во взвешенном состоянии и не слипаться до того, как краска начнет высыхать. А вот когда краска начнет высыхать, полимерные частицы должны начать слипаться. Как видите, все непросто.

Чтобы удержать полимерные частицы во взвешенном состоянии в виде эмульсии или суспензии, частицы должны быть покрыты оболочкой из особых реагентов, так называемых поверхностно-активных веществ. Заметим, что эмульсия — это микроскопические капли жидкости, распределенные в другой жидкости, а суспензия — мельчайшие твердые частицы, распределенные в жидкости. В обоих случаях частицы находятся во взвешенном состоянии, т. е. не оседают. Что касается поверхностно-активных веществ (ПАВ), то к ним относятся мыла и моющие средства, молекулы которых сами собой сосредоточиваются на поверхности раздела между маслом и водой и таким образом стабилизируют эти системы (подробнее — в разделе 18.2 о стирке). Молекулы ПАВ позволяют воде взаимодействовать с маслоподобными полимерными частицами. Каждая из частиц оказывается окружена хотя бы тонким слоем молекул воды, так что полимерные частицы не слипаются, пока краска хранится в банке.

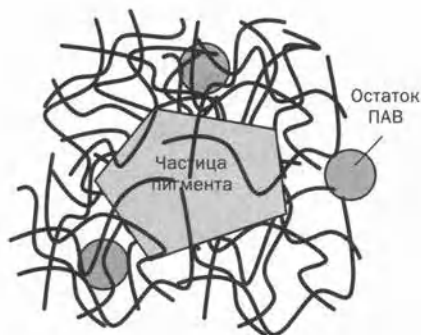
Но при высыхании латексной краски, когда вода испаряется, оставшаяся вода заставляет полимерные частицы сблизиться. Молекулы воды образуют друг с другом и с молекулами ПАВ водородные связи. Молекулы ПАВ связаны с полимерными частицами силами Ван-дер-Ваальса (подробнее — в разделе 18.1). По мере того как испаряющиеся молекулы воды оставляют зазоры между полимерными частицами, оставшиеся молекулы воды прижимают полимерные частицы ближе друг к другу. В конце концов частицы соприкасаются и молекулы полимеров начинают переплетаться. Частицы соединяются в единый материал (рис. 14.4.7).

Чтобы слипнуться определенным образом, молекулы полимера должны быть способны двигаться под действием тепловой энергии. Так как эта мобильность исчезает при температуре ниже температуры стеклования полимера, понятно, что температура стеклования должна быть как можно ниже. С другой стороны, низкая температура стеклования нежелательна, потому что тогда краска будет оставаться липкой. Чтобы избежать этого, производители обычно добавляют растворитель, который проникает в полимерные частицы и временно снижает их температуры стеклования. Благодаря этому частицы могут соприкасаться и слипаться, только пока растворитель не испарится. Как только растворитель улетучивается, температура стеклования увеличивается и краска теряет свою липкость. Строительным латексным краскам для полного высыхания требуется несколько недель.

Но в жаркий летний день солнце может нагреть сухую латексную краску выше температуры стеклования. При этом молекулы полимера в краске начинают двигаться, и краска приспособляется к изменениям. Это очень полезное свойство, поскольку таким образом ослабляется напряжение и не происходит образования трещин и пузырей. Водяной пар имеет возможность выходить через зазоры между полимерными цепями, и краска “дышит”. Вот почему латексные краски для наружных работ долговечнее масляных.

Но, к сожалению, движение полимерных цепей позволяет латексной краске собирать грязь. Частицы пыли, оказавшиеся на поверхности покрытия в жаркую погоду, могут попасть в полимерную цепь и испортить внешний вид краски. Кроме того, в жару краска склонна к слипанию, то есть прилипанию к себе самой. Если для клеев на синтетической основе, в частности контактных клеев, это хорошо, то для краски — ужасно. При соприкосновении двух недавно окрашенных латексной краской поверхностей очень часто они слипаются, даже если на ощупь казались сухими. В любом случае после окрашивания лучше не трогать латексную краску до того, как весь растворитель не улетучится и температура стеклования не поднимется до максимально возможной.

Так как в латексных красках частицы крупнее, чем в масляных, они не поднимаются к поверхности краски по мере испарения воды. В результате на поверхности латексного покрытия не образуется прозрачного, не содержащего пигмента слоя. Наличие частиц пигмента по всей глубине слоя краски до поверхности дела-



Высохшая латексная краска

Рис. 14.4.7. По мере высыхания латексной краски оставшиеся молекулы воды сдвигают вместе латексные шарики, пока те не сливаются в сплошную пленку.



ет латексную краску шероховатой для световых волн. Поэтому латексные краски не дают такого глянцевого сияния, как масляные.

Поскольку основной жидкостью в латексных красках является вода, они по сравнению с масляными содержат гораздо меньше летучих органических веществ. Однако большинство латексных красок все-таки содержат немного органических растворителей для размягчения полимерных частиц и облегчения их слипания. Многие также содержат органические растворители, замедляющие высыхание. Если бы единственной жидкостью в латексной краске была вода, краска высохла бы так быстро, что с ней невозможно было бы работать. Каждый нанесенный мазок уже застывал бы к тому моменту, когда вы готовы были нанести следующий, поэтому было бы очень трудно добиться равномерного окрашивания. Чтобы замедлить высыхание, в состав латексных красок в заметных количествах включают этилен и пропиленгликоль. Эти же два летучих вещества — органические спирты — являются основными компонентами автомобильных антифризов. Как растворители, они по свойствам похожи на воду, но гораздо медленнее испаряются. Органические спирты также защищают краску от замерзания, которое могло бы привести к разрушению краски из-за сжатия латексных частиц.

В краске содержатся и другие сомнительные с точки зрения экологии вещества. Грибки и бактерии действуют почти на все материалы, и краска не является исключением. Для борьбы с ними в краски включают фунгициды и бактерициды. Одним из распространенных и чрезвычайно эффективных фунгицидов и бактерицидов является органическое соединение ртути — ацетат фенилртути. Из-за токсичности ртути в 1990 году это вещество запретили для использования в помещениях, тем не менее его по-прежнему используют для наружных работ.

## Белые и металлические пигменты

Частицы пигментов придают краске непрозрачность, цвет или то и другое. Так как эти два параметра, непрозрачность и цвет, до некоторой степени не зависят друг от друга, мы будем рассматривать их по отдельности.

Пигмент содержится даже в чисто белой краске, правда, он совсем не поглощает света. Вместо этого его частицы почти идеально рассеивают свет в случайных направлениях. Частицы белого пигмента прозрачны, но имеют очень высокие показатели преломления. Когда эти частицы заключены в слой полимера, они производят в этом слое бесчисленные рассогласования импедансов.

Когда свет пытается проникнуть через краску, часть его отражается на каждой границе между полимером и пигментом, в результате свет практически не достигает противоположной стороны слоя. Благодаря шероховатости и беспорядочной случайной ориентации частиц пигмента, свет повсеместно рассеивается, что вызывает рассеянное свечение окрашенной поверхности. Краска выглядит белой.

Самые лучшие белые пигменты — те, что имеют самые высокие показатели преломления и менее всего склонны поглощать видимый свет. Чем выше показатель преломления, тем сильнее рассогласование импеданса и тем больше света отражается на каждой границе между полимером и пигментом. Высокая отражательная способность придает краске кроющую способность, или укрывистость, — свет не может достичь материала под слоем краски, а затем вернуться на поверхность окрашенного слоя, то есть цвет материала не будет просвечивать сквозь слой краски. Краски с очень высоким показателем преломления пигментов обладают самой высокой кроющей способностью.

Абсолютная прозрачность пигмента тоже очень важна, потому что любое поглощение света может придать краске цвет. Например, гранулы соли и сахара почти полностью прозрачны, и именно поэтому они выглядят белыми, когда от них отражается свет. Но при добавлении светопоглощающих пищевых красителей сахар кажется окрашенным.

На протяжении тысячелетий люди использовали мелкие частицы соединений кальция (известь, мел, гипс) для побелки. Однако показатели преломления этих соединений находятся в диапазоне от 1,5 до 1,7, так что их кроющая способность оставляет желать лучшего. До 1930-х годов наиболее распространенным белым пигментом были свинцовые белила (карбонат свинца). Показатель преломления этого прозрачного соединения равен 1,94, таким образом, его кроющая способность хоть

и ненамного, но выше, чем у соединений кальция. Увы, свинцовые белила ядовиты, и многие люди, живущие в зданиях старой постройки, не без оснований опасаются за свое здоровье. К счастью, на смену свинцовым белилам пришли нетоксичные белые пигменты с гораздо более высокой кроющей способностью.

В современных красках в качестве белого пигмента чаще всего применяется диоксид титана. Это соединение существует в двух кристаллических формах, рутил и анатаз, каждая из которых имеет очень высокий показатель преломления и почти абсолютную прозрачность. Показатель преломления рутила — 2,76, анатаза — 2,55. Более высокий показатель преломления рутила означает, что отражательная способность его частиц в краске и, следовательно, кроющие свойства выше, чем у частиц анатаза. В то же время рутил в небольшой степени поглощает синий свет, поэтому белые краски на основе рутила дают желтый оттенок. Если речь идет о цветных красках или оттенок не имеет значения, можно использовать краску на основе рутила, но если требуется чисто белый цвет, нужна краска с анатазом.

В некоторых красках в качестве пигментов используют металлические частицы. У металлических пигментов великолепная кроющая способность, потому что через металлическую частицу свет практически не проходит. Но металлы поглощают несколько процентов падающего на них света и преобразуют его энергию в тепловую. Свет, падающий на скопление металлических частиц, попадает в ловушку: он отражается от одной частицы к другой и поглощается прежде, чем может выбраться наружу. Вот почему кучка из шарообразных частиц металла кажется черной.

В противоположность этому металлические чешуйки выглядят блестящими, потому что они однократно отражают свет от поверхности. Каждая чешуйка действует как крошечное зеркало и создает свое собственное зеркальное отражение. В составе краски металлические чешуйки, как правило, ложатся примерно параллельно поверхности и придают ей блестящий “металлический” вид. Они не создают единого зеркального отражения, потому что не выровнены друг с другом. Но в то же время они не рассеивают свет равномерно во все стороны, как белый пигмент. Большинство металлических красок содержит чешуйки или порошок алюминия, хотя могут быть окрашены так, чтобы выглядеть, как другие металлы.

Перламутровые и радужные краски содержат чешуйки из прозрачных материалов со специальным покрытием для повышения отражающей способности. Каждая поверхность одной из таких чешуек с покрытием частично отражает свет, и интерференция между этими частичными отражениями создает окрашенное зеркальное отражение чешуйки. Поскольку чешуйки пропускают часть падающего на них света, они не выглядят металлическими. В окрашенном слое они также лежат примерно параллельно поверхности и придают ей необычный привлекательный вид. Радужные чешуйки широко применяются в автомобильных красках типа “металлик”, которым они придают слегка окрашенное поблескивание.

## Цветные краски

Пигменты и красители придают краске цвет, выборочно поглощая часть падающего на нее света. Так как отраженный свет имеет другой спектр длин волн, чем падающий, отраженный свет выглядит окрашенным.

Например, когда на красную краску падает белый свет, краска поглощает свет, который мог бы стимулировать зеленые или синие глазные рецепторы. Остается только свет, стимулирующий красные рецепторы, поэтому мы видим красную краску. Зеленая краска поглощает все световые волны, кроме тех, которые стимулируют зеленые рецепторы, а синяя — все, кроме тех, которые действуют на синие рецепторы.

Вы видите этот отраженный свет благодаря тому, что содержащиеся в краске пигменты отражают любой непоглощенный свет. В некоторых случаях пигменты действуют и как поглотители цвета. Наконец, в каких-то случаях используется белый пигмент, обычно диоксид титана, а в качестве поглотителей цвета выступают отдельные молекулы красителя, которые избирательно поглощают свет определенных длин волн, а остальной свет пропускают неизменным.

Независимо от того, применяются ли только пигменты или комбинации пигментов и красителей, для придания окрашенной поверхности цвета используется сочетание отражательной способности и селективного поглощения. Тщательно

подбирая длины поглощаемых волн и степень их поглощения, можно создать краску любого цвета на свой вкус.

Действие большинства цветных пигментов основано на особых молекулах, которые поглощают свет в определенном диапазоне длин волн. Многие соединения металлов, среди которых медь, хром, железо, сурьма, никель, свинец, поглощают определенные длины волн света и кажутся ярко окрашенными. Особенно красивые цвета дают пигменты на основе свинца и соединений свинца с хромом, но они слишком токсичны. Органические красители, хотя их нужно смешивать с белыми пигментами, также весьма эффективны, поэтому во многих красках они заменили соединения металлов. (Об истории органических красителей см. ❸.)

Как вы уже поняли, многие краски создаются путем смешивания различных пигментов и красителей в тщательно выверенных пропорциях. Регулируется это смешивание при помощи расширенной версии правил субтрактивной системы (с. 484). В обычной субтрактивной системе используются три основных цвета: голубой (который поглощает красный), пурпурный (поглощает зеленый) и желтый (поглощает синий). В принципе, соответствующая смесь этих трех пигментов может создать какой угодно цвет. На практике, однако, идеальных голубых, пурпурных и желтых пигментов и красителей не существует, а близкие к идеалу образцы дорого стоят. Вместо этого производители работают с более разнообразным набором базовых пигментов и красителей. Смешивая их по разным правилам и рецептам, из этих основных цветов можно получить краску практически любого цвета.

Чернила похожи на краски за одним исключением: они содержат только красители. Из-за отсутствия отражающих пигментов чернила обычно прозрачны, хотя и окрашены, а задача отражения света ложится на бумагу под ними. Бумага состоит главным образом из целлюлозы, прозрачного природного полимера. Поскольку в бумаге эта целлюлоза тонко измельчена, она отражает свет каждой своей поверхностью и бумага выглядит белой. На практике белизну бумаги дополнительно повышают в процессе производства нанесением белых пигментов. Прозрачные политуры, по сути, представляют собой чернила, которые наносят на древесину.

Обычная цветная печать выполняется при помощи чернил черного и трех других экономически и технически обоснованных цветов, наиболее близких к основным: голубому, пурпурному и желтому. Варьируя соотношение этих четырех красок на каждом участке страницы, принтер практически полностью контролирует цвета рисунка, которые вы видите, когда рассматриваете его при дневном свете. Но поскольку каждый вид чернил наносится по отдельности, нужно, чтобы принтер очень точно накладывал их друг на друга. Неаккуратная цветная печать, когда желтое, голубое, пурпурное и черное чернильные изображения смещены относительно друг друга, выглядит нечетко и неряшливо. Такое качество нередко встречается в газетах.

Высококачественные дорогостоящие нечатные работы часто выполняются с использованием более чем четырех видов чернил. Поскольку невозможно добиться абсолютной точности совмещения отдельных цветов, для решения сложных полиграфических задач применяются дополнительные цвета, что позволяет избежать смешения разных чернил непосредственно на странице. Вместо того чтобы получить красную букву "Н", вначале напечатать желтую "Н", а точно поверх нее — пурпурную "Н", принтер использует красные чернила и печатает "Н" за один прием. Тот же принтер может нанести на каждый рисунок прозрачный слой лака, чтобы добиться глянцевого эффекта. Глянец появляется как результат зеркального отражения от гладкой лакированной поверхности, следствия рассогласования импеданса между воздухом и лаком.

## Сложности с краской

К сожалению, свет, который поглощают молекулы пигмента, часто разрушает эти молекулы. Особенно опасны синий и ультрафиолетовый свет, чьи фотоны обладают большой энергией. Таким образом, молекулы, поглощающие синий свет — то есть те, которые создают красный или зеленый цвета, — могут быть повреждены и разрушены при длительном воздействии солнечного света. Наверняка вам приходилось видеть выгоревшие на солнце фотографии или рисунки. Красные пигменты, как правило, разрушаются первыми, и картинка отливает синим.

❶ Еще восемнадцатилетним студентом английский химик Уильям Генри Перкин (1838–1907) загорелся мыслью синтезировать препарат хинин. Он исходил из упрощенного понимания органической химии, характерного для того времени, и потому его идеи вряд ли были осуществимы. Но вместо хинина он открыл новый краситель, который назвал анилином фиолетовым, или мовеином. До того фиолетовые, лиловые и пурпурные красители были редкими и дорогими. А теперь пурпурные наряды, которые прежде считались привилегией королей, стали доступны для обычных людей. Для производства этого красителя Перкин основал компанию в Германии и тем самым положил начало развитию анилино-красочной промышленности Германии.

На самом деле очень важно защищать краски и окрашенные поверхности от повреждения светом. Солнечный свет может подействовать не только на молекулы пигмента, но и на связующие вещества, которые удерживают краску вместе. Белые или металлические пигменты могут защитить и саму краску, и поверхность под ней, поглощая или отражая ультрафиолетовый свет. Особенно хорошо с этой задачей справляется диоксид титана. Аналогичную защитную функцию выполняют солнцезащитные кремы, которые поглощают ультрафиолетовое излучение и тем самым отчасти предохраняют вашу кожу.

Тем не менее многие из пигментов и связующих веществ, в особенности те, что используются в живописи, просто недостаточно стойки, чтобы выдерживать длительное воздействие синего или ультрафиолетового света. Такие картины часто хранятся в условиях низкой освещенности и выставляются на обозрение только в длинноволновом, желтоватом свете. Желтый свет менее вреден для молекул, чем белый, но он влияет на то, какими мы видим картины. Краска не может отражать несуществующий свет. Синяя краска должна отражать синий свет, но когда никакого синего света для отражения нет, краска выглядит черной. При желтом освещении синяя краска поглощает красный и зеленый свет, и никакого света просто не остается. Очевидно, что зрительное восприятие красок очень зависит от освещения.

Зависимость от освещения создает проблемы при подборе красок. При одном освещении две краски могут казаться совершенно одинаковыми, при другом — разными. Например, в красном свете синяя и черная краски кажутся черными, но при белом освещении сразу видна разница. Аналогичным образом две краски, которые выглядят одинаковыми при освещении лампами накаливания, будут несколько отличаться при свете люминесцентной лампы. Такое поведение называется метамерией, ее можно избежать, только подбирая краски идентичного состава, содержащие те же пигменты и красители. Если невозможно произвести химический подбор, приходится подбирать цвета при определенном освещении. Тем не менее метамерия иногда полезна, например при чтении выцветших старых писем. При соответствующем освещении можно значительно увеличить контраст между чернилами и бумагой.

## Флуоресцентные и фосфоресцентные краски

В большинстве случаев пигменты и красители избирательно поглощают свет определенных длин волн и преобразуют его световую энергию в тепловую. Тем не менее существует два важных исключения из этого правила: флуоресцентные и фосфоресцентные краски. Красители и пигменты в этих красках превращают в тепловую только часть световой энергии, а остальное переизлучают в виде волн с другими характеристиками.

Если поглощение и переизлучение происходит быстро, то это флуоресценция — разновидность люминесценции, того явления, при помощи которого люминесцентная лампа преобразует ультрафиолетовое излучение в видимый свет. Во флуоресцентных красках атом или атомоподобная система поглощает фотон, превращает часть его энергии в тепловую, а затем излучает новый фотон с более низкой энергией. Свет, излучаемый флуоресцентной системой, всегда характеризуется большей длиной волны, чем поглощаемый свет. Например, красный флуоресцентный краситель или пигмент может поглощать синий свет и в результате излучать красный. Если вы направите на красный флуоресцентный краситель или пигмент синий свет, они будут светиться красным.

Флуоресцентные красители и пигменты широко применяются повсюду, от одежды до маркеров. Окрашенная флуоресцентной краской зеленая рубашка излучает больше зеленого света, чем белая, потому что она фактически преобразует падающий на нее синий свет в зеленый. Многие предметы одежды или визитные карточки кажутся белоснежными благодаря тому, что содержат флуоресцентные пигменты или красители, которые преобразуют ультрафиолетовый свет в белый или синевато-белый. Такие предметы действительно излучают больше видимого света, чем абсолютно белые, но нефлуоресцентные поверхности. В состав многих средств для стирки входят так называемые «усилители и освежители цвета» — фактически это люминесцентные вещества, которые после стирки застревают в тканях и преобразуют ультрафиолетовый свет в видимый.

Фосфоресцентные краски отличаются тем, что процесс переизлучения происходит вскоре после поглощения, но не сразу. Задержка фосфоресценции может составлять несколько секунд, часов или даже дней. Причина ее в том, что атомы или атомоподобные системы задерживаются в возбужденном состоянии, когда не могут происходить нормальные излучательные переходы. Как правило, нормальный переход бывает запрещен, если у электрона, который пытается перейти из возбужденного состояния в основное, несоответствующий спин и принцип Паули не дает ему перейти в основное состояние, пока не произойдет поворот спина. Необычные процессы излучения, в результате которых электрон в конце концов возвращается в основное состояние, происходят крайне медленно. Краски, содержащие фосфоресцентные красители и пигменты, испускают свет в течение длительного времени. Обычно их называют светящимися красками.

## Декоративная косметика: цвета и освещение

Почти все, что я сказал о краске, справедливо для декоративной косметики и краски для волос. Помимо физиологических целей, например увлажнения, снятия раздражения или смягчения, макияж — это в первую очередь краски для лица и тела. Аналогичным образом краски для волос меняют или восстанавливают естественную окраску волос.

Как и краски, средства декоративной косметики могут включать пигменты, красители и связующие вещества. Пигменты — это микроскопические частицы, поэтому они производят множество отражений, которые и придают косметическим средствам кроющую способность. Всякий раз, когда свет входит или выходит из частицы пигмента, часть этого света отражается. Если пигмент представляет собой бесцветный прозрачный порошок, то он выглядит белым. Если частицы пигмента — крошечные металлические листочки, они создают металлический отблеск. Когда в качестве пигмента используются мельчайшие прозрачные чешуйки, они дают поблескивающие, отливающие перламутром, переливающиеся отражения. Во всех случаях свет не проникает глубоко в макияж, поэтому косметика маскирует естественный тон кожи.

Красители избирательно поглощают световые волны с определенными характеристиками, позволяя остальным волнам проходить через слой макияжа. Сами по себе красители не обладают кроющей способностью, поэтому косметические средства, содержащие только молекулы красителя, не могут скрыть природного тона кожи. Такая косметика только фильтрует свет, который падает на кожу и отражается от нее, так что кожа выглядит темнее или приобретает другой оттенок. Обычно средства декоративной косметики содержат как пигменты, так и красители, чтобы сочетать маскирующую способность с корректировкой тона.

Связующие вещества удерживают пигменты и красители на коже, а также влияют на отражательную способность пигментов. Так как прозрачный порошок кажется белым только тогда, когда его частицы разделены между собой материалом с другим показателем преломления, связующее для содержащих пигменты косметических средств, как правило, имеет более низкий показатель преломления, чем сами пигменты.

Кроме того, от связующих веществ во многом зависит внешний вид поверхности. Если связующее образует гладкий прозрачный верхний слой, то покрытие будет поблескивать. Свет будет частично отражаться от зеркальной поверхности — примерно так же, как от оконного стекла. Это идеально подходит для блеска для губ, но не годится для щек. Чтобы придать коже ровный матовый тон, связующее вещество должно позволить частицам пигмента оказаться на поверхности покрытия. Один из распространенных способов избежать поблескивания — накладывать рассыпчатую пудру поверх слоя связующего вещества. Вот почему женщины запудривают блестящие участки на лице.

Поскольку макияж только отражает или перенаправляет падающий свет, он очень по-разному выглядит при различном освещении. Чтобы это учесть, специальные зеркала для макияжа или косметические зеркала позволяют выбрать между двумя источниками света: лампами накаливания и люминесцентными. Лампы накаливания усиливают красную область спектра и содержат относительно немного синего или фиолетового света, поэтому почти любой макияж при

освещении лампами накаливания будет казаться теплым, подчеркивая насыщенные красные, персиковые и желтые тона. Женщина, которая собирается провести вечер при свечах или лампах накаливания, для получения желаемого эффекта должна накладывать макияж при аналогичном освещении. Если же она будет краситься при люминесцентном освещении, зеленые, синие и фиолетовые тона, которые она увидит, накладывая макияж, при свете ламп накаливания будут казаться гораздо более темными. Вечер может кончиться разочарованием.

С другой стороны, люминесцентный и солнечный свет включают сильные синие и фиолетовые компоненты, поэтому при освещении этими видами света макияж кажется более холодным: в нем заметнее синий и фиолетовый. Женщина, которая планирует провести время при люминесцентном освещении или на открытом воздухе, должна и краситься под люминесцентной лампой. При свете лампы накаливания можно недооценить отражение зеленого, синего и фиолетового и переоценить отражение красного, оранжевого и желтого. И тогда в люминесцентном или солнечном свете, вероятно, окажется, что она не слишком удачно выбрала цвета макияжа.

## Солнцезащитные кремы, ароматизаторы и краски для волос

---

Даже бесцветные косметические средства часто содержат красители. Эти красители поглощают ультрафиолетовый свет и тем самым в некоторой степени защищают от ультрафиолетового облучения. Поскольку фотон ультрафиолетового излучения несет достаточно энергии, чтобы повредить обычную биологическую молекулу, подставлять кожу этим фотонам — плохая идея. Ультрафиолетовые фотоны вызывают повреждения клеток кожи и генетической информации, и эти повреждения носят кумулятивный характер, то есть накапливаются в течение жизни. Единственное и самое главное, что вы можете сделать для сохранения здоровой кожи, — круглый год пользоваться макияжем, кремами или солнцезащитными средствами, которые поглощают ультрафиолетовый свет.

Многие косметические средства и все духи и одеколоны содержат ароматизирующие вещества, молекулы которых проходят через слой косметики к поверхности и постепенно улетучиваются. От того, насколько сильна химическая связь между молекулами ароматизатора и связующим веществом, а также от температуры кожи того, кто пользуется содержащим их средством, зависит, насколько быстро будут испаряться молекулы ароматизатора. Правильно составленные смеси будут испускать ароматизаторы в воздух постепенно, слой за слоем, в течение всего вечера.

Средства для окрашивания волос представляют собой красители, которые закрепляются на волосах. Молекулы красителей для стойкого длительного окрашивания, как правило, образуются внутри каждого волоса в результате химических процессов, происходящих во время окрашивания. Поскольку молекулы встраиваются внутрь волоса, их чрезвычайно трудно удалить и цвет волос сохраняется очень долго. Молекулы красителей, содержащиеся в мягких красках — оттеночных и окрашивающих шампунях, ополаскивателях и пенках, обычно покрывают поверхность волоса снаружи и остаются там в течение ограниченного времени.

Так как краски для волос не содержат пигментов, они практически не обладают кроющей способностью и должны иметь дело со светом, отраженным от волос хозяина. Человек со светлыми от природы волосами может без особых усилий перекрасить их в темные, а вот темноволосому человеку, вероятно, придется сначала осветлить или обесцветить волосы, а уже потом перекрашивать их в другой цвет. Механизм обесцвечивания и отбеливания я объясню в разделе 18.2 о стирке.

Исключениями являются оттеночные ополаскиватели для волос. Содержащиеся в них красители могут добавить тональный оттенок к естественному блеску даже самых темных волос. Как глянцевая черная краска, темные волосы отражают часть падающего света, особенно когда свет падает под небольшим углом. Не обработанные оттеночными средствами темные волосы благодаря этому частично отраженному свету выглядят блестящими. Но если волосы покрыты окрашенными молекулами, частично отраженный свет также будет иметь определенный цвет.

---

## ГЛАВА 15

# ОПТИКА

---

**Р**абота множества полезных устройств основана на использовании света: фотоаппараты фиксируют изображения всего, что находится перед ними, наши глаза позволяют нам видеть это “все”, очки и увеличительные стекла помогают разглядеть детали, которые без них мы бы упустили. Другие приборы, в том числе CD- и DVD-плееры, тоже используют свет, но это не имеет ничего общего со зрением. Тем не менее во всех этих случаях для управления светом применяются одни и те же методы — методы оптики.

Люди заинтересовались оптикой, когда заметили, что капля воды на зеленом листе искажает его вид или что прозрачный кристалл кварца может изменить нуть проходящего через него света. Но многие из самых важных и запоминающихся открытий в этой области были сделаны хорошо знакомыми нам персонажами: Галилей построил один из первых телескопов, Ньютон, пытаясь разделить белый свет на цветные компоненты, экспериментировал с призмами, а Бенджамин Франклин изобрел бифокальные очки. Греческий ученый Архимед, согласно легенде, поджег корабли римлян, сфокусировав солнечные лучи при помощи вогнутых зеркал.

Даже если история Архимеда — миф, поджигание дерева солнечным светом через увеличительное стекло — по-прежнему своего рода обряд посвящения для начинающего физика. Разумеется, я сам, а позднее и мой сын часами совершенствовали свои навыки поджигания дерева солнцем. Я до сих пор помню, какой восторг испытал, читая “Таинственный остров” Жюль Верна: там инженеру удалось оживить снасительный огонь при помощи зажигательного стекла, которое он сделал, заполнив водой два выпуклых часовых стекла.

Такие оптические инструменты, как линзы и призмы, известны уже сотни лет, но в последнее время успехи современной техники ускорили развитие оптики. Подобно тому, как изобретение транзисторов дало толчок развитию электронной промышленности, изобретение лазеров подтолкнуло рост оптической промышленности. Эти две области не так уж далеки друг от друга, и есть надежда, что в один прекрасный день в компьютерах будет столько же оптики, сколько и электроники.

### 512 15.1 Фотоаппараты и зрение

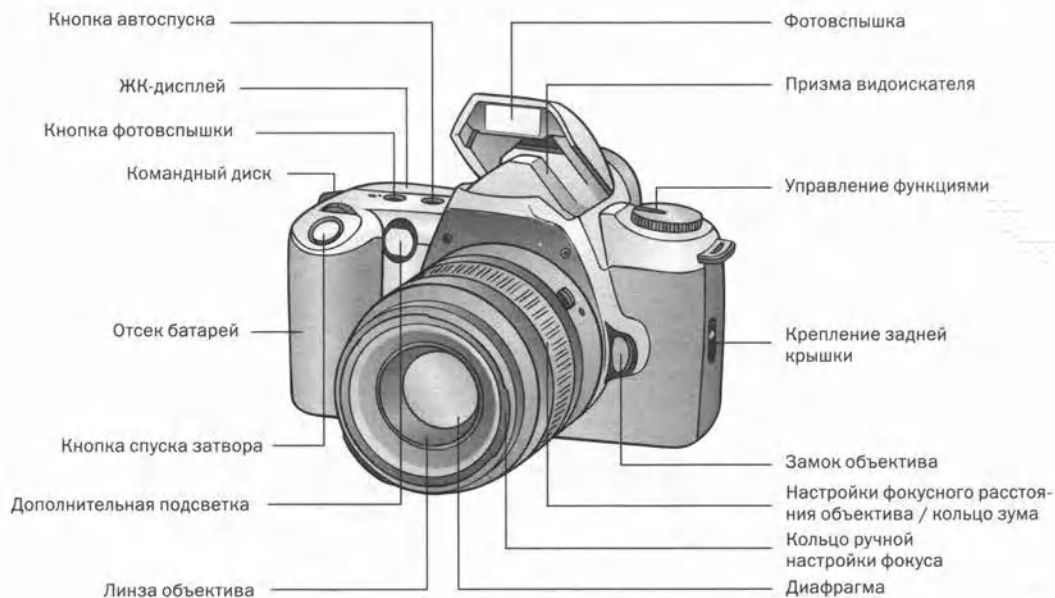
*Как фотоаппараты фиксируют то, что находится перед ними, и каким образом мы это видим*

### 528 15.2 Оптическая запись и связь

*Как оптические устройства используются для хранения и передачи информации.*

### 539 15.3 Телескопы и микроскопы

*Как оптические приборы помогают нам видеть очень далекое и очень маленькое.*



## 15.1 Фотоаппараты и зрение

За те два столетия, что прошли с момента их изобретения, фотоаппараты стали очень простыми в использовании. Фотография — когда-то увлечение немногих посвященных — теперь доступна каждому. Но, несмотря на все технические усовершенствования, фотография во многом основывается на тех же принципах, что и в XIX веке. Изображение по-прежнему проецируется на светочувствительную поверхность при помощи линз, а фотографы должны думать о том, как правильно выбрать экспозицию, настроить фокус и избежать размытости, если объект быстро движется. В этом разделе мы рассмотрим главные принципы работы фотоаппарата.

### Линзы и действительные изображения

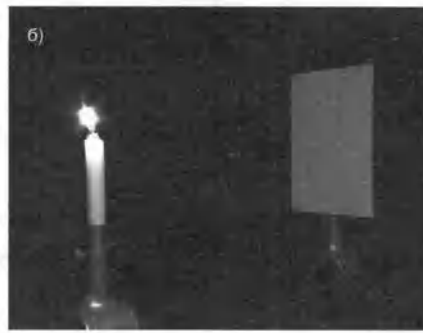
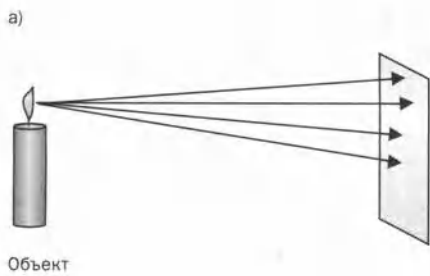
Когда вы фотографируете сцену, которую видите в реальности, линзы в объективе вашей камеры преобразуют свет от этой сцены в действительное изображение на светочувствительной поверхности. Действительное изображение — картина, которая образуется, когда свет проецируется в пространство или на поверхность, и которая точно воспроизводит картину света в исходной сцене. Поскольку проецируемое действительное изображение выглядит точь-в-точь как сцена, которую вы фотографируете, запись и сохранение картины света в этом изображении эквивалентны сохранению изображения самой сцены.

Когда-то в качестве светочувствительной поверхности выступала только фотопленка, но сейчас ее постепенно вытесняют цифровые камеры с электронными светочувствительными элементами. К счастью, эти две светочувствительные поверхности по большому счету взаимозаменяемы, поэтому мы можем говорить просто о двух типах датчиков изображения: электронном и фотохимическом.

Действительное изображение не рождается само по себе. Когда свет от свечи падает непосредственно на датчик изображения, он производит только рассеянное освещение (рис. 15.1.1, а). Кроме того, глядя на лист бумаги, вы не можете сказать, как выглядит свеча, потому что свет от нее распространяется во всех направлениях с равной вероятностью попадания в любую часть бумажного листа (рис. 15.1.1, б).

Вот почему фотоаппарату нужен объектив, содержащий линзу — прозрачное тело, которое использует преломление для формирования изображения. Проходящий через линзу свет преломляется дважды: первый раз, когда входит в стекло или пластик, и второй, когда из него выходит. В объективе камеры процесс преломления собирает большую часть света от одной точки свечи в одной точке

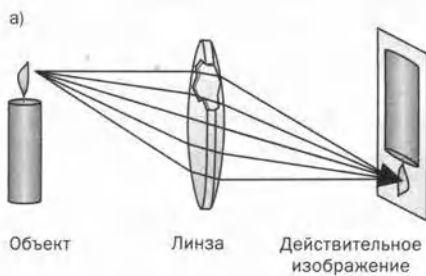




**Рис. 15.1.1.** (а) В отсутствие линзы свет от свечи равномерно освещает датчик изображения. (б) Когда свет от свечи падает непосредственно на лист бумаги, он не создает изображения.

на датчике. Как видно на **рис. 15.1.2**, возникающее действительное изображение перевернуто вверх ногами и справа налево. Если для создания изображения используется одна линза, то действительное изображение всегда перевернуто относительно снимаемого объекта.

Линза создает действительное изображение благодаря своей изогнутой форме. Свет, проходящий через верхнюю половину линзы, меняет направление и отклоняется вниз, в то время как свет, проходящий через нижнюю половину линзы, отклоняется вверх. Поскольку линза в объективе фотоаппарата направляет световые лучи друг к другу, это собирающая линза. На **рис. 15.1.2, б**, проследив за ходом лучей, выходящих из одной точки свечи, вы можете увидеть, как она формирует изображение.



**Рис. 15.1.2.** (а) Когда между свечой и датчиком помещается линза, она собирает вместе лучи, исходящие от каждой точки свечи, в соответствующих точках на поверхности датчика, образуя перевернутое вверх ногами и справа налево действительное изображение свечи. Расстояние между объективом и датчиком должно быть правильно выбрано, иначе изображение будет размытым. (б) Помещенная между свечой и бумагой линза образует на бумаге перевернутое действительное изображение пламени.

Верхний луч от пламени свечи распространяется горизонтально в направлении верхней части линзы. Этот луч входит в линзу и замедляется, при этом отклоняясь вниз. Затем он еще раз отклоняется вниз, когда выходит из линзы и направляется к нижней части датчика изображения.

Нижний луч на выходе из пламени свечи наклонен вниз по направлению к нижней части линзы. При входе в линзу он отклоняется вверх. Затем он еще раз отклоняется вверх на выходе из линзы и идет горизонтально по направлению к нижней части датчика изображения.

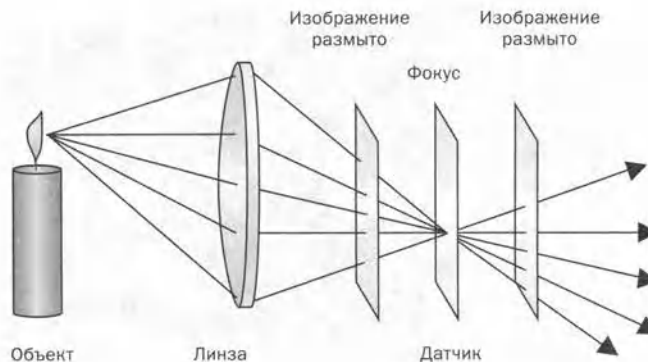
Эти два луча касаются датчика изображения в одной и той же точке. Там к ним присоединяется еще множество лучей от той же части пламени свечи, так что на датчике формируется яркое пятно. В итоге каждой части свечи соответствует определенное освещенное место на датчике изображения, и линза создает на датчике полное изображение свечи.

При этом следует учитывать, что линза может собрать лучи вместе и сформировать четкое изображение на датчике, только если линза и датчик находятся точно на нужном расстоянии друг от друга (**рис. 15.1.3**). Если датчик находится слишком близко к линзе, то лучам не хватает длины пробега, чтобы сойтись в одной точке. Если датчик находится слишком далеко от линзы, то лучи начинают снова расходиться, не успев достигнуть датчика. В обоих случаях изображение на датчике получается размытым. Действительное изображение свечи оказывается в фокусе только при одном, строго определенном расстоянии от линзы до датчика\*.

Если придвигать свечу к линзе или отодвигать от нее, то необходимо соответствующим образом менять расстояние между линзой и датчиком (**рис. 15.1.4**).

\* Формально это так, но на датчике есть минимальный размер, требуемый для изображения светящейся точки. Для матрицы современного фотоаппарата это один пиксель, для фотопленки — размер зерна фотозмульсии. Поэтому изображения предметов чуть ближе или дальше на датчике будут выглядеть не более размытыми, чем изображение предметов в фокусе. Фотографы называют глубиной резкости разность расстояний до самых далеких и самых близких предметов или людей, которые не выглядят размытыми. Она возрастает с уменьшением размеров диафрагмы.

**Рис. 15.1.3.** Действительное изображение находится в фокусе только тогда, когда датчик изображения установлен на строго определенном расстоянии от линзы. Если датчик слишком близко или слишком далеко от линзы, изображение размыто.

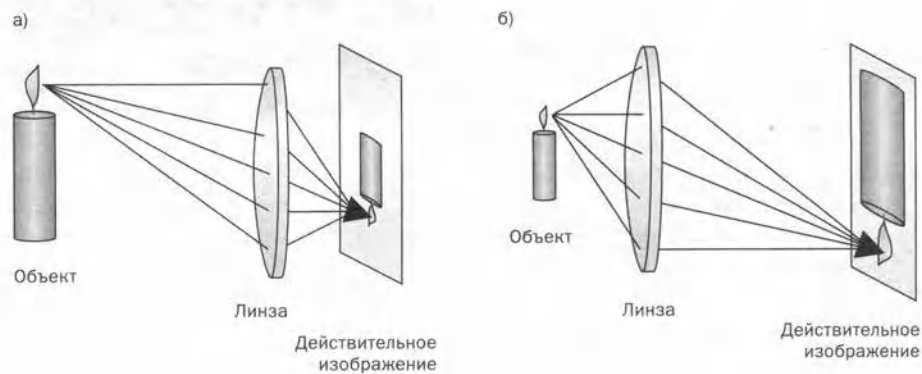


Если свеча далеко от линзы, все световые лучи, которые проходят через линзу, движутся по почти параллельным траекториям и, подвергшись преломлению внутри линзы, собираются вместе относительно недалеко от нее. Именно там, в точке фокусировки, должен располагаться датчик (**рис. 15.1.4, а**). Изображение свечи на датчике намного меньше, чем сама свеча, потому что лучи, покинув линзу, могут пройти только короткое расстояние вверх или вниз до точки фокусировки.

Когда свеча находится рядом с линзой, исходящие от нее лучи едва успевают разойтись до входа в линзу. Преломления, вызванного линзой, едва хватает, чтобы эти лучи вообще могли сойтись. В результате лучи образуют фокус относительно далеко от объектива (**рис. 15.1.4, б**). Изображение свечи на датчике получается довольно большим, потому что лучам после выхода из линзы нужно пройти значительное расстояние до точки фокусировки.

Поскольку далекие и близкие объекты образуют действительные изображения на разных расстояниях от объектива фотоаппарата, они не могут одновременно находиться в фокусе на одном и том же датчике изображения. Когда вы фотографируете человека на фоне горы, в фокусе может быть только что-то одно — либо человек, либо гора. Тем не менее, если вы готовы слегка пожертвовать четкостью, иногда линзы могут создать приемлемые изображения обоих объектов.

**Рис. 15.1.4.** (а) Свет от удаленной свечи распространяется почти в одном и том же направлении, поэтому линза легко его фокусирует. Действительное изображение формируется недалеко от линзы. (б) Лучи от расположенной рядом с линзой свечи расходятся, линза с трудом собирает их обратно вместе. Действительное изображение формируется далеко от линзы. Если свеча находится слишком близко к линзе, изображения вообще не возникает.



## Фокусировка и диаметр объектива

Одноразовый фотоаппарат — это не просто коробка с объективом. Объектив проецирует действительное изображение того, что находится перед ним, на датчик изображения. Свет действительного изображения в течение какого-то времени воздействует на датчик (производит экспозицию), а затем датчик фиксирует изображение. Конечно, в этом простом аппарате еще может быть затвор, который начинает и останавливает экспозицию, вспышка, обеспечивающая дополнительный свет, и механизм подготовки к следующей фотографии, но к этому почти нечего добавить.

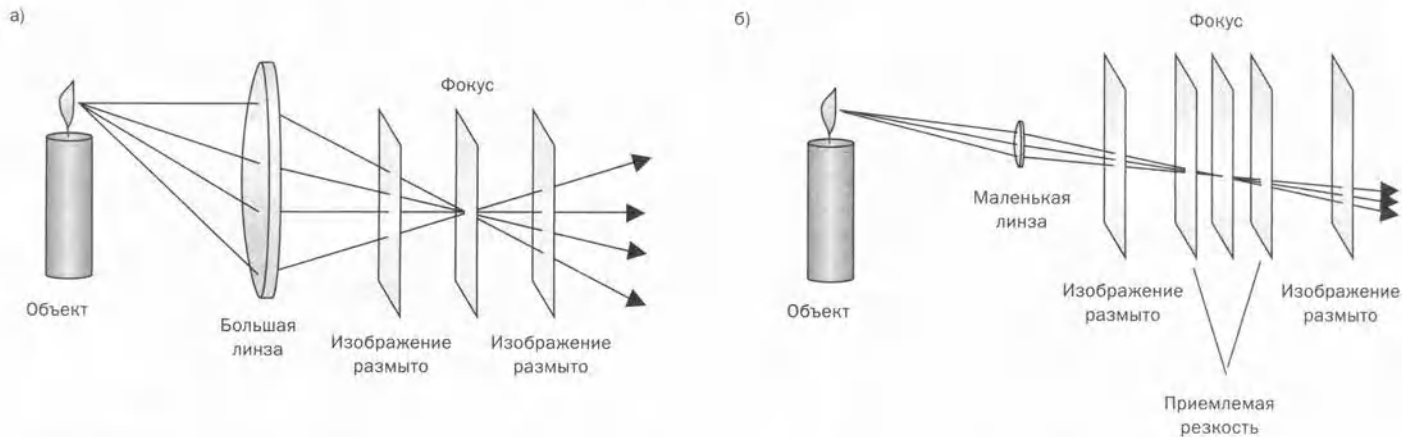
В то же время конструкция одноразовых камер обуславливает существенные ограничения. Главное из них состоит в том, что вы не можете менять фокус — камера имеет фиксированное расстояние между объективом (т. е. линзой) и датчиком изображения. Тем не менее такой аппарат может создать на датчике

относительно четкое действительное изображение, даже когда объекты съемки находятся на разных расстояниях от камеры. Эти простые аппараты работают благодаря тому, что используют линзы малого диаметра. Маленький объектив собирает меньше света, чем широкий, но не требует фокусировки — регулировки расстояния между объективом и датчиком изображения\*.

Поскольку широкая линза с большим диаметром сводит вместе лучи, приходящие с самых разных сторон, их необходимо точно сфокусировать (рис. 15.1.5, а). Если датчик изображения окажется хоть чуть-чуть ближе или дальше, чем нужно, от линзы, записанное изображение будет размытым. Но линза малого диаметра способна создать достаточно четкое изображение даже без фокусировки. Любые лучи от одной части изображаемой сцены, которым удастся пройти через линзу малого диаметра, изначально расположены достаточно близко друг к другу. В этом случае сходящиеся лучи освещают лишь небольшую часть датчика изображения, даже когда датчик немного смещен по отношению к объективу (рис. 15.1.5, б). Поскольку датчик все равно не может записывать мельчайшие детали, изображение, которое на нем формируется, необязательно должно быть точно в фокусе. В результате камерой с линзой малого диаметра и без регулировки фокуса удастся сделать вполне приличные фотографии.

К сожалению, такие простые камеры пропускают очень мало света, и для них нужны датчики с очень высокой светочувствительностью. Эти высокоскоростные датчики не дают такой хорошей резкости изображения, как низкоскоростные. Кроме того, на снимках, полученных при помощи простых камер, не хватает мелких деталей; хотя кажется, что все почти в фокусе, при ближайшем рассмотрении или при увеличении видно, что многие объекты вышли нечетко.

В более сложных, усовершенствованных фотоаппаратах используются более широкие линзы, которые собирают больше света и требуют меньшей выдержки, то есть меньшего времени экспозиции датчика. Кроме того, они автоматически регулируют расстояние между объективом и датчиком. Камера оценивает объект съемки и устанавливает объектив так, чтобы добиться максимальной резкости изображения. Когда камера фокусируется, обычно можно увидеть, как компоненты объектива двигаются вперед или назад, чтобы оказаться на нужном расстоянии от датчика.



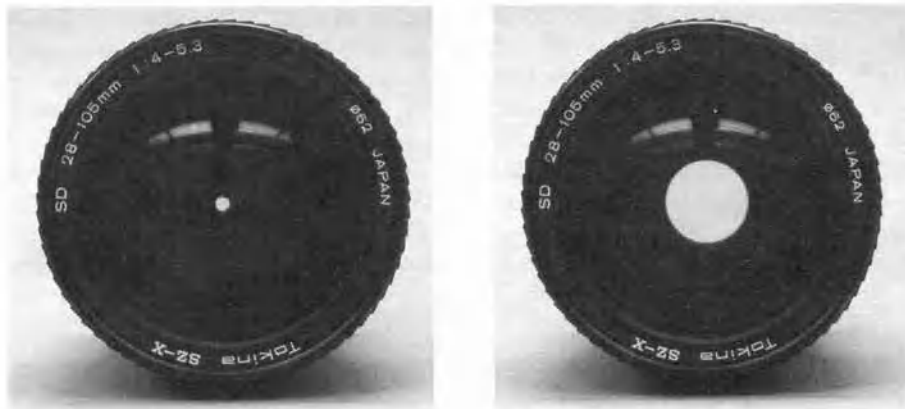
При этом аппараты с линзами большого диаметра могут использовать те же приемы фокусировки, что и линзы малого диаметра. Объектив содержит внутреннюю диафрагму, которая уменьшает отверстие или эффективный диаметр. Диафрагма представляет собой кольцо из поворотных металлических лепестков с отверстием посередине. Лепестки могут сходиться и расходиться, изменяя диаметр отверстия диафрагмы и тем самым настраивая так называемую апертуру, или относительное отверстие объектива (рис. 15.1.6).

При сужении отверстия диафрагмы сложный фотоаппарат работает как простой. Почти все само попадает в фокус. В этом случае камера имеет большую глубину резкости. В действительности усовершенствованные аппараты могут идеально поместить в фокус наиболее важный объект съемки, поэтому сделанные ими снимки по качеству намного превосходят фотографии, снятые простыми камерами. Однако сужение отверстия диафрагмы также уменьшает количе-

\* Короткофокусный фотоаппарат с маленькой диафрагмой имеет большую глубину резкости и способен получать удовлетворительное изображение предметов, которые находятся не слишком близко к нему. Положение линзы зафиксировано, поэтому оно выбрано так, чтобы в этот интервал расстояний попадали и очень далекие предметы, и предметы на средних расстояниях. Если бы одноразовый фотоаппарат мог фокусировать изображение, то снимки близких предметов могли бы быть качественнее. При этом длиннофокусный фотоаппарат с таким же объективом будет обладать небольшой глубиной резкости, поскольку она определяется не только диаметром объектива.

**Рис. 15.1.5.** (а) Большая линза собирает много света, но нужно очень точно выдерживать фокусное расстояние. Изображение четкое только непосредственно в точке фокуса. (б) Маленькая линза собирает меньше света, но поблизости от фокуса формирует достаточно резкие изображения.

Рис. 15.1.6. Можно уменьшить отверстие объектива, закрывая внутреннюю диафрагму. При этом затемняется изображение, но увеличивается глубина резкости.



ство света, достигающего датчика изображения. Объект съемки перед камерой должен быть очень ярким, или экспозиция должна быть относительно долгой. Одно из двух, иначе не бывает.

Открывая диафрагму шире, линза большого диаметра в полной мере использует свою способность пропускать и концентрировать свет, но при этом узким местом становится фокусировка. Даже небольшая ошибка в выборе расстояния от объектива до датчика приводит к тому, что изображение получается расплывчатым, то есть глубина резкости очень мала. Фотографы постоянно сталкиваются с проблемой баланса между выдержкой (длительностью экспозиции) и диафрагмой, которая определяет глубину резкости. Правда, иногда они сознательно используют маленькую глубину резкости при открытой диафрагме, чтобы сделать размытым либо задний, либо передний план. В цифровых камерах такая стратегия заложена в установках режима “портрет”, что дает возможность получать четкие изображения людей на размытом фоне.

В других случаях фотографы выбирают длинную выдержку при суженном отверстии диафрагмы, чтобы в фокусе оказалось все, что находится перед камерой. Соответствующие установки заложены в режим “ландшафт”, когда все объекты на фотографии видны в деталях. А чтобы заснять быстрое движение, сохраняя при этом большую глубину резкости, фотографы используют вспышку, чтобы ярко осветить сцену и сократить время экспозиции. К сожалению, фотовспышка не годится для освещения удаленных объектов, кроме того, она может давать ненужные отражения от окон и глаз. Установки режима “спорт” поддерживают главным образом короткую выдержку, чтобы избежать размытости, связанной с быстрым движением, хотя это может потребовать открытой диафрагмы и небольшой глубины резкости.

## Фокусные расстояния и f-числа

Объективы характеризуются двумя величинами: фокусным расстоянием и f-числами. Фокусное расстояние объектива — это расстояние между линзой и действительным изображением бесконечно удаленного объекта. Например, если действительное изображение луны образуется на расстоянии 100 мм (4 дюйма) от линзы, значит, линза имеет фокусное расстояние 100 мм. Фокусные расстояния объективов фотоаппаратов находятся в диапазоне от менее 10 мм (0,4 дюйма) у многих компактных камер до 2 м (7 футов) для камер, предназначенных для съемок природы.

Проходя через линзу с коротким фокусным расстоянием, свет от объекта съемки фокусируется недалеко от самой линзы и создает на датчике относительно небольшое по размеру действительное изображение. Длиннофокусная линза дает возможность лучам прошедшего через нее света сильнее разойтись до попадания в фокус и таким образом создает на датчике большее по размеру действительное изображение.

Фокусное расстояние штатного объектива фотоаппарата позволяет уместить на датчике изображения все объекты, попадающие в центральное поле вашего зрения. Когда вы держите готовую фотографию на расстоянии 30 см (1 фут) от глаз, объекты на снимке кажутся вам примерно такими же по размерам, как и во вре-

Таблица 15.1.1. Ширина датчика изображения и фокусное расстояние штатных объективов некоторых типов фотоаппаратов

Тип фотоаппарата	Ширина датчика изображения	Фокусное расстояние объектива
Обычный цифровой ф/а	8 мм	12 мм
35 мм фотоаппарат	36 мм	50 мм
Среднеформатный ф/а 57 мм (2 ¼ дюйма)	57 мм (2 ¼ дюйма)	80 мм
Крупноформатный ф/а для портретной съемки 127 мм (5 дюймов)	127 мм (5 дюймов)	180 мм

мя съемки. Фокусное расстояние штатного объектива примерно в 1,5 раза больше ширины датчика изображения.

По сравнению со штатным, широкоугольный объектив имеет более короткое фокусное расстояние (рис. 15.1.7). Изображение, которое он проецирует на датчик, меньше, но ярче. Кроме того, на снимке появляются все объекты, которые охватывает ваше полное поле зрения. Фокусное расстояние у телеобъектива

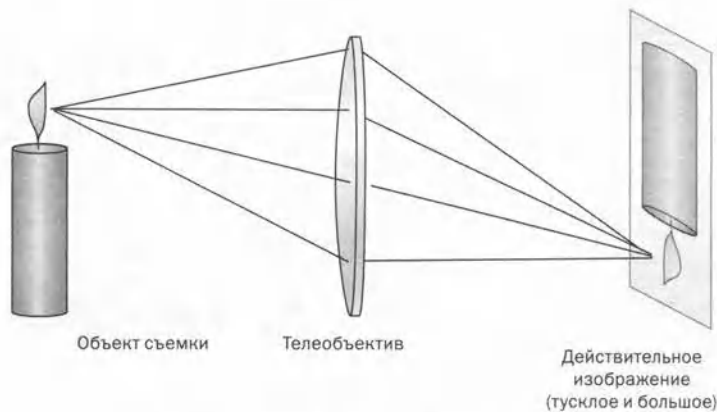
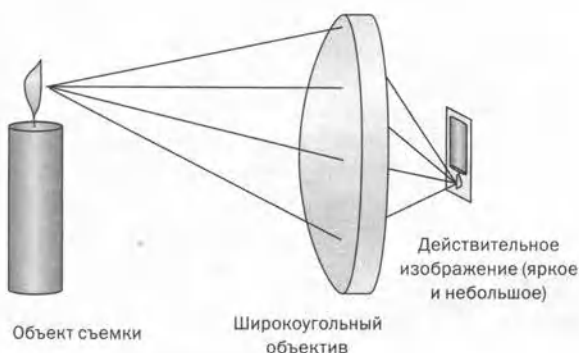


Рис. 15.1.7. У широкоугольного объектива фокусное расстояние небольшое, он создает маленькие и яркие действительные изображения недалеко от линзы.

Рис. 15.1.8. У телеобъектива длинное фокусное расстояние, и он образует крупное, но тусклое действительное изображение далеко от линзы.

длиннее, чем у штатного (рис. 15.1.8). Изображение, которое он проецирует на датчик, больше по размеру, но и более тусклое. На снимок попадают только объекты, находящиеся в центре сцены.

Фокусное расстояние не только показывает, на каком расстоянии от линзы формируется изображение, но и связывает расстояние от объекта съемки до линзы с расстоянием между линзой и действительным изображением (рис. 15.1.9).

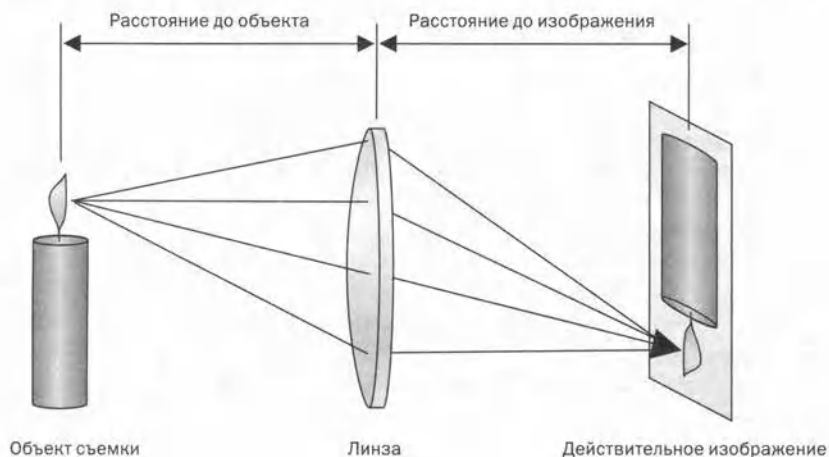


Рис. 15.1.9. Отношение между расстоянием до объекта, расстоянием до изображения и фокусным расстоянием линзы описывается уравнением линзы.

\* Это уравнение выполняется для единичной тонкой линзы. Современный дорогой фотоаппарат может иметь сложный объектив с несколькими линзами. Формула 15.1.1 продолжает работать, но расстояние надо отсчитывать не от линзы, а от двух плоскостей, которые оптики называют главными плоскостями.

Отношение называется уравнением или основной формулой линзы и записывается следующим образом\*:

$$\frac{1}{\text{фокусное расстояние}} = \frac{1}{\text{расстояние от предмета до линзы}} + \frac{1}{\text{расстояние от линзы до изображения}} \quad (15.1.1)$$

### Уравнение линзы

Единица, деленная на фокусное расстояние линзы, равна сумме единицы, деленной на расстояние от предмета до линзы, и единицы, деленной на расстояние от линзы до изображения.

В соответствии с уравнением линзы, для бесконечно удаленного объекта расстояние от линзы до изображения равно фокусному расстоянию линзы. Это вполне согласуется с тем, что мы уже говорили о фокусном расстоянии.

Но при приближении объекта съемки расстояние до изображения становится больше, чем фокусное расстояние. Вот почему, когда вы фокусируетесь на близлежащем предмете, объектив камеры перемещается подальше от датчика изображения. И когда расстояние до объекта становится меньше, чем фокусное расстояние, расстояние до изображения становится отрицательным и никакое действительное изображение вообще не формируется. Вот почему вы не можете сфокусироваться на предмете, который находится слишком близко к объективу.

Дифрагменное число линзы, или  $f$ -число, характеризует яркость действительного изображения, которое образуется на датчике изображения. Чем меньше  $f$ -число, тем ярче изображение.  $f$ -число рассчитывается делением фокусного расстояния линзы на ее диаметр (или на диаметр дифрагменного отверстия). Поскольку, как мы знаем, длиннофокусные линзы производят на датчике более крупные и более тусклые изображения,  $f$ -число учитывает как способность пропускать свет, так и фокусное расстояние линзы\*\*.

Увеличение диаметра линзы увеличивает площадь светопропускания, то есть количество пропускаемого линзой света, и снижает  $f$ -число. Увеличение фокусного расстояния линзы уменьшает яркость действительного изображения и увеличивает  $f$ -число. Если одновременно прodelьывать то и другое — увеличивать диаметр линзы и фокусное расстояние в равных пропорциях, — яркость и  $f$ -число не изменятся.

Наиболее сложные камеры используют линзы большого диаметра, так что их  $f$ -числа, как правило, меньше 4. Очень трудно изготовить линзу, у которой диаметр был бы больше, чем фокусное расстояние, поэтому наименьшее из встречающихся на практике  $f$ -чисел — примерно 1. А поскольку длиннофокусным линзам для поддержания низких значений  $f$ -числа нужны большие дифрагменные отверстия, некоторые телеобъективы имеют огромные размеры.

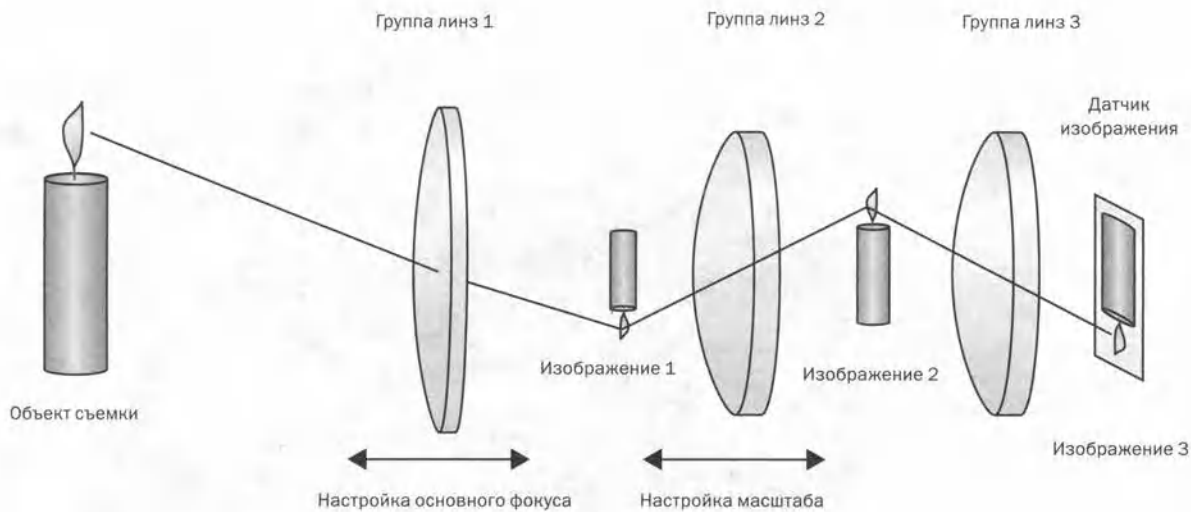
Расположенная внутри объектива диафрагма позволяет уменьшить отверстие и тем самым увеличить  $f$ -число. Увеличение  $f$ -числа в два раза соответствует двукратному уменьшению эффективного диаметра линзы и четырехкратному уменьшению площади светопропускания объектива. Таким образом, чтобы скомпенсировать увеличение  $f$ -числа в два раза, необходимо в четыре раза увеличить время экспозиции. Уменьшая отверстие диафрагмы, вы увеличиваете глубину резкости, но тогда выдержка должна быть длиннее.

## Повышение качества объектива

Высококачественный объектив — это не просто одна линза из стекла или пластика. Современный объектив состоит из множества отдельных элементов, которые функционируют как единое целое. Многокомпонентность повышает качество действительного изображения. Начнем с того, что при рассеивании одной линзой световые лучи разных цветов по-разному преломляются и, соответственно, фокусируются на разных расстояниях от линзы. Эта проблема называется хроматической аберрацией, и решить ее можно применением нескольких линз с различными рассеивающими свойствами, изготовленными из различных видов стекла. Эти элементы компенсируют друг друга, так что в целом у системы, которую называют ахроматическим объективом, почти нет проблем с фокусировкой лучей разных цветов.

\*\* В бывшем СССР часто используется величина, обратная  $f$ -числу, называемая относительным отверстием.

❶ Хороший объектив корректирует еще ряд недостатков изображения, помимо уже перечисленных. Он всегда старается направить весь свет от определенной части объекта съемки на соответствующую часть датчика изображения. К возможным дефектам изображения относятся сферическая аберрация, кома и астигматизм. Сферическая аберрация возникает из-за того, что линзу, как правило, шлифуют в виде части поверхности гигантского шара. Сферическую форму относительно легко изготовить, но сферические линзы далеко не идеальны. Асферические линзы, как правило, лучше, но их изготовление требует очень сложного оборудования. Кома возникает при попытке сфокусировать свет от объекта, находящегося далеко от центра снимка. Линзы плохо фокусируют свет, проходящий через них под малыми углами. Причина астигматизма в том, что края плоского датчика изображения фактически расположены дальше от объектива, чем центр датчика.



**Рис. 15.1.10.** Для проецирования действительного изображения нужного размера на датчик изображения в зум-объективе обычно используются три группы линз. Размер меняется в основном за счет того, что при перемещении второй группы линз меняются расстояния от объекта до линзы и от линзы до изображения. Первая группа линз отвечает за фокусирование, третья группа проецирует действительное изображение на датчик.

Объектив фотоаппарата может содержать более десяти отдельных элементов, призванных справиться с проблемой цвета и другими техническими сложностями коррекции изображения (см. ❶). Согласно уравнению линзы, этот сложный объектив должен иметь эффективный центр, от которого отсчитываются фокусное расстояние и расстояние до изображения\*\*\*. Однако из-за наличия многочисленных отдельных элементов возникает проблема отражения; каждый раз, когда свет попадает из воздуха в стекло и наоборот, часть его отражается. Чтобы изображение не затуманивалось из-за переотражения рассеянного света, на отдельные элементы объектива наносят тонкое антибликовое покрытие из прозрачных материалов\*\*\*\*. Лучшие покрытия для гашения отраженных световых волн используют эффекты интерференции и придают линзе лишь слабый фиолетовый отблеск.

Многие современные камеры оснащены зум-объективами. Зум-объектив — сложная система, позволяющая менять размер действительного изображения, которое проецируется на датчик изображения. Перемещая элементы объектива относительно друг друга, зум-объектив может регулировать эффективное фокусное расстояние.

Наиболее распространенный тип зум-объектива содержит три отдельные группы линз и создает последовательность из трех изображений (рис. 15.1.10). Первая группа линз создает первое изображение сцены перед камерой. Вторая группа линз, в свою очередь, создает изображение этого первого изображения. И наконец, третья группа линз проецирует третье, действительное изображение второго изображения на датчик. Зуммирование объектива, то есть изменение его фокусного расстояния, включает в себя изменение расстояния между группами линз. При этом для второй группы линз меняются расстояния от объекта до линзы и от линзы до изображения, то есть меняются относительные размеры первого и второго изображений.

По мере того как зум-объектив меняет короткое фокусное расстояние на длинное, проецируемое на датчик изображение становится больше. Этот прием позволяет добиваться того, чтобы сцена занимала всю площадь снимка. Объектив, который может менять фокусное расстояние, при этом сохраняя  $f$ -число и держать действительное изображение в фокусе на датчике, является поистине замечательным достижением.

## Видоискатель и мнимые изображения

Однообъективный зеркальный фотоаппарат (SLR, или в просторечии зеркалка) дает возможность подбирать и менять линзы в зависимости от решаемой задачи. Глядя

\*\*\* Эти расстояния отсчитываются от главных плоскостей (см. примечание на с. 516). Совпадать друг с другом и образовывать "эффективный центр" они могут только для одной тонкой линзы, но не для сложного объектива.

\*\*\*\* Это обычно называют "просветлением оптики".

**Рис. 15.1.11.** В этом зеркальном фотоаппарате зеркало направляет свет от объектива (для этой фотографии его сняли) на фокусирующий экран над ним. Во время экспозиции зеркало поднимается вверх и дает возможность свету от линзы дойти до датчика изображения на задней панели камеры.

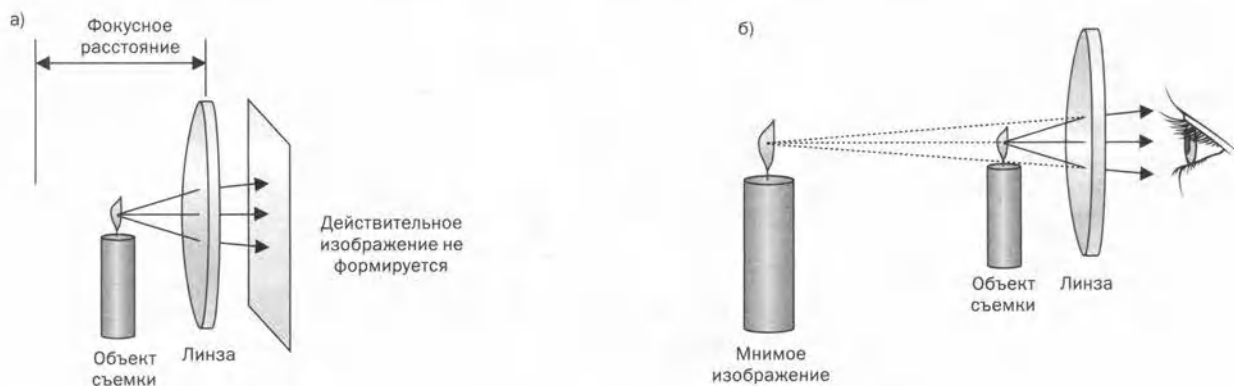


в видоискатель зеркальной камеры (**рис. 15.1.11**), вы смотрите на то же самое действительное изображение, которое будет спроецировано на датчик изображения во время экспозиции. Свет, который вы видите, проходит через основной объектив аппарата, отражается от зеркала и проецируется на полупрозрачный экран внутри верхней части камеры. Вы просто рассматриваете этот экран и действительное изображение через увеличительное стекло в окуляре. Во время экспозиции зеркало отодвигается в сторону и действительное изображение проецируется на датчик изображения.

Поскольку экран и действительное изображение находятся в одном-двух дюймах (3–5 см) от ваших глаз, вы не можете сфокусировать на них свой взгляд без помощи линзы окуляра. Это собирающая линза, но в данном случае она не создает действительное изображение. Изображение, которое она создает, называется мнимым — оно расположено на отрицательном расстоянии от линзы до изображения, то есть по другую сторону линзы!

Экран, показывающий сцену фотосъемки, расположен так близко к окуляру, что расстояние от него до линзы меньше фокусного расстояния этой линзы. В соответствии с уравнением линзы, расстояние до изображения должно быть отрицательным. Так оно и есть, и это изображение находится по отношению к линзе со стороны экрана (**рис. 15.1.12**). Вы не можете поместить руку в луч света и проецировать это изображение на свою ладонь, потому что изображение является мнимым, а не действительным.

**Рис. 15.1.12.** (а) Свет от объекта, находящегося вблизи собирающей линзы, после прохождения через линзу расходится, не образуя действительного изображения. (б) Ваш глаз видит мнимое изображение — увеличенное и удаленное.







**Рис. 15.1.13.** Это увеличительное стекло создает увеличенное мнимое изображение, расположенное далеко позади печатного текста. Вы не можете коснуться изображения или поместить пальцы в свет от него, но вы можете хорошо его разглядеть.

Однако вы можете увидеть это изображение через окуляр. Оно находится гораздо дальше от ваших глаз, чем сам экран, так что вы можете без труда на нем сфокусироваться. К тому же изображение будет увеличенным — линза окуляра работает как увеличительное стекло (**рис. 15.1.13**). Увеличение происходит благодаря тому, что, когда вы смотрите на экран через линзу, изображение на экране занимает большую часть вашего поля зрения, чем без нее. Степень увеличения тем больше, чем меньше фокусное расстояние линзы окуляра. Дело в том, что линза окуляра с более коротким фокусным расстоянием должна располагаться очень близко к экрану, где она может преломлять световые лучи, исходящие из меньшей области, так, чтобы они заполняли все ваше поле зрения. В обычном фотоаппарате окуляр выбирают так, чтобы экран заполнял оптимальную часть вашего поля зрения, то есть чтобы вы могли без напряжения рассматривать мнимое изображение и менять линзы и настройки фотоаппарата, пока не добьетесь нужной, на ваш взгляд, картинки. После этого вам останется только сделать снимок.

Камеры с фиксированным расположением линз часто снабжены двумя отдельными видоискателями. Типичная цифровая камера имеет небольшой электронный видоискатель, он показывает действительное изображение, которое проецируется на датчик. Но многие цифровые и все пленочные фотоаппараты оснащены еще и оптическими видоискателями. Оптические видоискатели различаются по стилю и сложности, но лучшие из них совмещают действительное и мнимое изображение. Такой оптический видоискатель — это система линз, зеркал и/или призм, которая создает неперевернутое действительное изображение объекта. Затем вы рассматриваете это действительное изображение через увеличительное стекло окуляра. Линзы, проецирующие действительное изображение, масштабируют изображение синхронно с главным объективом камеры, поэтому то, что вы видите через видоискатель, очень похоже на то, что появится на снимке.

## Датчики изображения

После того как объектив спроецировал действительное изображение на датчик изображения, его задача — зафиксировать эту световую картину. Интересно, что и пленочные, и электронные датчики изображения используют полупроводники и обнаруживают свет, когда фотоны переводят электроны с валентных уровней на уровни проводимости. Но вот на электронные переходы эти два типа датчиков реагируют совершенно по-разному.

Фотопленка обнаруживает свет фотохимически. Пленка содержит микрокристаллы солей серебра. Состоящие в основном из атомов серебра и галогенов, эти полупроводниковые кристаллы чрезвычайно чувствительны к свету. Когда

кристалл галогенида серебра поглощает фотон видимого света, может произойти излучательный переход: электрон переходит с валентного уровня на уровень проводимости, и в конечном счете из молекулы галогенида серебра высвобождается один атом серебра. После того как под воздействием света выделяется какое-то количество соседних атомов серебра, они могут объединиться в микрочастицу металлического серебра. При проявлении пленки эта частица серебра превращает весь кристалл галогенида серебра в металлическое серебро. Благодаря микроскопически шероховатой структуре это серебро выглядит черным, а не блестящим.

В черно-белой фотографии негативное изображение на проявленной пленке образуют сами частицы серебра. Там, где на пленку падал свет, она приобретает характерную плотную черную структуру частиц серебра. Там, где света не было, пленка становится прозрачной, потому что необлученные соли серебра смываются при обработке пленки. На проявленной пленке мы видим негативное изображение — светлое выглядит темным, а темное — светлым, но в процессе печатания темное и светлое повторно меняются местами, так что на готовых снимках остается нормальное, так называемое позитивное изображение.

Что касается цветной фотографии, то в этом случае кристаллы галогенида серебра подвергаются воздействию света через цветные фильтры и сенсibilизаторы, так что пленка по отдельности фиксирует засвечивание тремя основными цветами света (см. раздел 14.2). В процессе проявления серебро вымывается, но на пленке остается негативное цветное изображение. Например, там, где на пленку падал синий свет, она становится желтой и поэтому поглощает синий свет. Как и в черно-белой фотографии, в процессе печати происходит повторное обращение цветов и на снимках образуется позитивное изображение.

Электронные датчики изображения обнаруживают свет при помощи специально предназначенных для этого диодов, или фотодиодов. Фотодиод — это в каком-то смысле светодиод наоборот (раздел 14.3). Напомним, что светодиод излучает свет, когда при движении электронов от катода к аноду они совершают излучательный переход с уровня проводимости на валентный уровень. Светодиод использует электрический ток, чтобы произвести свет. Фотодиод же, наоборот, поглощает свет, когда электроны движутся от анода к катоду и совершают излучательный переход с валентного уровня на уровень проводимости. Фотодиод использует свет, чтобы произвести электрический ток.

Чтобы зафиксировать картину света в действительном изображении, электронный датчик изображения использует огромный набор микроскопических фотодиодов. Под воздействием света каждый фотодиод накапливает электроны на катоде, затем фотоаппарат измеряет накопленный на каждом фотодиоде заряд. Чтобы получить информацию о цвете, фотодиоды датчика изображения покрыты сетью из красных, зеленых и синих фильтров, так что каждый фотодиод измеряет интенсивность света только одного основного цвета.

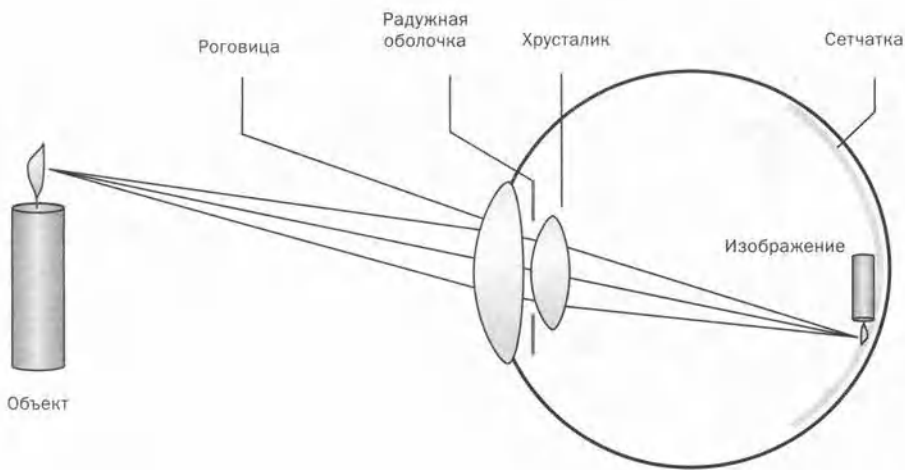
## Глаза и очки

---

Не все фотоаппараты нуждаются в современных технологиях. Большинство людей рождаются с двумя уже готовыми: это наши глаза. Как и вышеописанные камеры, каждый глаз состоит в первую очередь из собирающей линзы и датчика изображения (рис. 15.1.14). В данном случае линза представляет собой сочетание передней поверхности глазного яблока, роговицы и внутренней линзы — хрусталика — под роговицей. Датчиком изображения служит сетчатка, обширная структура светочувствительных клеток и нервов, расположенная в задней части глазного яблока.

Когда вы смотрите на сцену перед вами, роговица и хрусталик вашего глаза проецируют действительное изображение этой сцены на сетчатку и сетчатка передает возникающую картину света мозгу. Как обычно, действительное изображение перевернуто вверх ногами и слева направо, но мозг ставит все на место.

Поскольку, в отличие от фотоаппарата, глазное яблоко не может менять расстояние между линзой и сенсором изображения, оно фокусирует действительное изображение, изменяя фокусное расстояние хрусталика. Когда вы смотрите на близкий объект, кривизна хрусталика увеличивается и его фокусное расстояние уменьшается. Таким образом, световые лучи от близкого объекта сходятся более



**Рис. 15.1.14.** Человеческий глаз похож на фотоаппарат: роговица и хрусталик формируют на сетчатке действительное изображение. Глаз фокусируется, меняя кривизну хрусталика. Радужная оболочка регулирует не только яркость изображения, но и апертуру глаза, а следовательно, и глубину резкости.

резко и формируют на сетчатке действительное изображение. Когда вы смотрите вдаль, кривизна хрусталика уменьшается, его фокусное расстояние увеличивается.

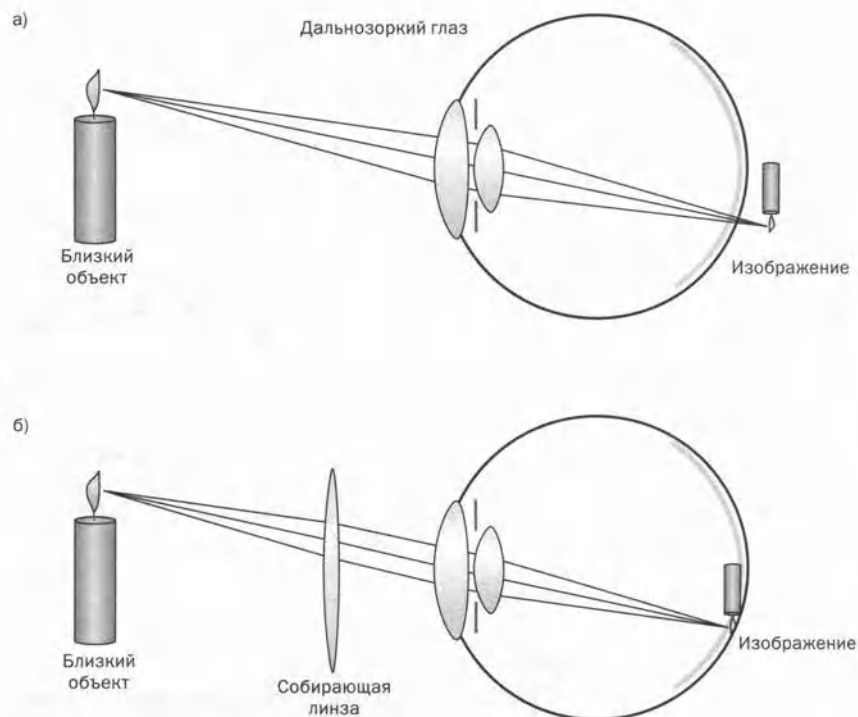
Как и сложные фотоаппараты, наши глаза имеют диафрагму — радужную оболочку. Когда мы смотрим на яркий свет, радужная оболочка сжимается, чтобы ограничить количество света, через зрачок попадающего на сетчатку. При этом, в качестве дополнительного эффекта, увеличивается глубина резкости и все кажется более четким. При хорошем освещении глазу легче сфокусироваться.

Но не все глаза совершенны, и многим для формирования резких действительных изображений на сетчатке нужна помощь. Хотя современные методы лазерной хирургии позволяют улучшить четкость изображения путем изменения формы роговицы, классический подход к решению проблемы — очки или контактные линзы — по-прежнему актуален. Оптическая система глаза уже состоит из двух компонентов, роговицы и хрусталика, и добавить к ним третий — очки — не составляет большого труда.

Человек, страдающий дальностью зрения, не может хорошо видеть близлежащие предметы, потому что его оптическая система имеет слишком большое фокусное расстояние (**рис. 15.1.15, а**). В то время как проецирование на сетчатку действительных изображений удаленных объектов происходит нормально, изображения близких предметов фокусируются слишком далеко от передней части глаза. Свет доходит до сетчатки раньше, чем успевает сформировать действительное изображение. Чтобы компенсировать дальность зрения, люди носят очки с собирающими линзами (**рис. 15.1.15, б**). Эти линзы начинают собирать световые лучи вместе еще до того, как они попадают в глаз. Собственная оптическая система человека завершает преломление этих лучей, действительное изображение образуется ближе к передней части глаза и попадает на сетчатку. Это дает дальновидным людям возможность нормально видеть вблизи.

Что касается близорукости, то тут все наоборот — близорукий человек не может сфокусироваться на удаленном объекте, потому что его оптическая система имеет слишком короткое фокусное расстояние (**рис. 15.1.16, а**). Действительное изображение удаленного объекта образуется слишком близко к передней части глаза, и свет начинает расходиться, не успев достигнуть сетчатки.

Чтобы компенсировать близорукость, люди носят очки с рассеивающими линзами (**рис. 15.1.16, б**). Рассеивающая линза преломляет лучи так, что они расходятся, следовательно, у нее отрицательное фокусное расстояние. Как правило, более тонкая в середине, чем по краям, рассеивающая линза преломляет почти параллельные лучи света от удаленного объекта так, что они расходятся быстрее. Кажется, будто эти лучи исходят от гораздо более близкого объекта (на самом деле — мнимого изображения), и наши глаза способны должным образом сфокусировать этот свет на сетчатке.



**Рис. 15.1.15.** (а) Дальнозоркий глаз слишком слабо преломляет свет, чтобы сфокусироваться на близком объекте. Действительное изображение образуется позади сетчатки. (б) Собирающая линза смещает действительное изображение ближе к линзе, так что оно фокусируется на сетчатке.

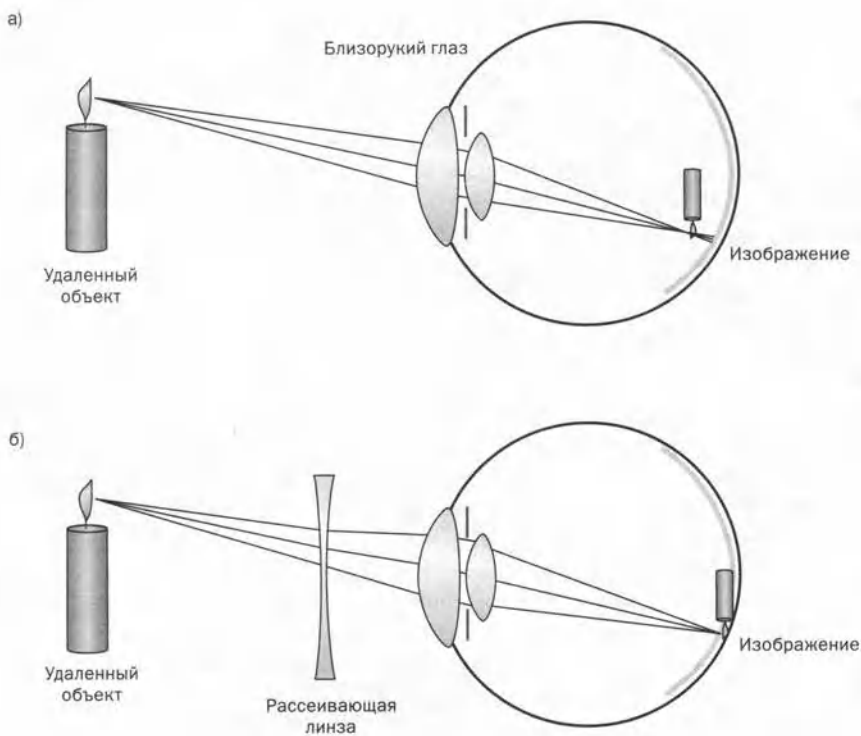
## Проекторы

Проектор — это не что иное, как вывернутый наизнанку фотоаппарат. В то время как фотоаппарат проецирует действительное изображение далекой сцены на находящуюся рядом пленку или датчик изображения, проектор создает действительное изображение с находящейся рядом пленки или другого источника изображения на удаленном экране. Но есть некоторые особенности, ради которых все-таки стоит ненадолго остановиться на проекторах.

Во-первых, действительное изображение, которое проектор формирует на экране, должно быть достаточно ярким, чтобы его было видно из любой точки зала. Чем больше размер изображения, тем сильнее рассредоточено освещение. Яркость изображения зависит от его площади; удвоение ширины изображения в четыре раза увеличивает его площадь. Чтобы поддерживать яркость изображения, количество выходящего из проектора света должно увеличиваться пропорционально квадрату ширины изображения.

Даже в затемненном кинотеатре свет, освещающий отрезок пленки или другого источника изображения, должен быть очень ярким. Кроме того, он обязательно должен быть белым, чтобы не влиять на цвета изображения. Единственный источник, который может обеспечить достаточно белый и достаточно яркий свет, — электрическая газоразрядная лампа.

До недавнего времени кинопроекторы работали на дуговых лампах с угольными электродами (рис. 15.1.17). Такие лампы производят ослепительно белый свет, используя электрический разряд между двумя угольными стержнями. Два стержня на мгновение соприкасаются, чтобы начать разряд, который затем развивается в небольшом заполненном воздухом зазоре. Разряд поддерживается до тех пор, пока в зазоре имеется достаточно заряженных частиц, способных переносить электрический ток от одного стержня к другому. Так как стержни медленно сгорают в воздухе, мотор постепенно придвигает их друг к другу.



**Рис. 15.1.16.** (а) Близорукий глаз слишком сильно преломляет свет, чтобы сфокусироваться на удаленном объекте. Действительное изображение образуется перед сетчаткой. (б) Рассеивающая линза смещает реальное изображение дальше от линзы, так что оно фокусируется на сетчатке.

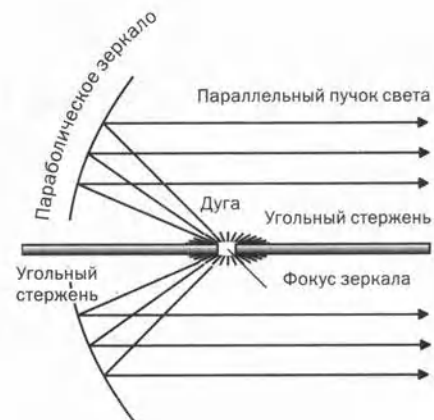
Позднее дуговые лампы с угольными электродами были заменены на дуговые лампы с ксеноном, криптоном и галогенидами металлов. Эти электрические газоразрядные лампы высокого давления дают яркий белый свет, не требуя замены створевших угольных стержней. Но эти лампы дорогие и недолговечные — вещества из электродов оседают на стенках лампы, со временем она темнеет, и в конце концов ее приходится менять.

В процессе работы свет от газоразрядной лампы собирают при помощи параболического зеркала и пропускают через пленку или источник изображения. О параболических зеркалах поговорим позднее в этой главе, когда будем рассматривать телескопы. На данный момент важно только, что параболическое зеркало собирает весь свет, образующийся при небольшом разряде, и направляет его в одну сторону. Этот процесс сведения света в интенсивный параллельный пучок называется коллимацией.

Освещенная ярким белым светом пленка или другой источник превращается в объект, и линза проектора создает на экране его действительное изображение. Поскольку действительное изображение всегда перевернуто по отношению к объекту, изображение на пленке или другом источнике во время демонстрации тоже перевернуто.

Почти целое столетие проекторы работали с пленкой: диапроекторы-фильмоскопы — со слайдами, кинопроекторы — с катушками кинолент. Пленка создает яркий объект, с которым проектору удобно работать: он поглощает нежелательные части проходящего через него белого света. Выходящий из пленки свет выглядит уже как исходная сцена, и проектор подает увеличенное действительное изображение с пленки на экран. При использовании диапроектора один слайд может оставаться на экране столько, сколько вам захочется. Учебный графпроектор работает примерно таким же образом, хотя вместо слайда используется большой кусок пластика, на котором можно писать и рисовать.

Показ фильмов сложнее, чем показ слайдов, так как включает движение и звук. Вместо того чтобы проецировать на экран одно изображение, кинопроектор пере-



**Рис. 15.1.17.** Для освещения пленки или другого источника изображения в кино- и видеопроекторах используются электрические газоразрядные лампы. На данной схеме разряд между двумя угольными стержнями производит интенсивное белое излучение, которое при помощи параболического зеркала сводится в яркий пучок белого света.

дает последовательность изображений обычно со скоростью 24 кадра в секунду. Это означает, что 24 раза в секунду свет от газоразрядной лампы проектора временно блокируется, текущий кадр удаляется и заменяется на новый кадр, после чего свет восстанавливается. Изображение на экране тускнеет, полностью чернеет, потом на этом месте появляется новое изображение — и все это за сотые доли секунды.

Инерция зрительного восприятия не дает нам видеть мерцание между сменяющимися кадрами — точно так же мы не замечаем, из чего состоит телевизионное изображение. Наши глаза просто не могут отличить непрерывно движущийся объект от стремительно сменяющихся друг друга последовательных стоп-кадров.

Инерцию зрительного восприятия открыл в 1824 году английский врач Питер Марк Роже (1779–1869). На ней были основаны многочисленные оптические игрушки середины и конца XIX века — движущиеся картинки. Но только в 1894 году благодаря кинетоскопу Томаса Эдисона зритель получил возможность в течение более или менее продолжительного времени (15 секунд) наблюдать движущуюся пленку со снимками людей и предметов.

Кинетоскоп построен на том, что наблюдатель через окуляр смотрит непосредственно на склеенную в кольцо целлулоидную фотопленку, которая движется над мигающим источником света. При прохождении каждого кадра перед глазами наблюдателя на мгновение включается свет. Наблюдатель видит быструю последовательность статических изображений и воспринимает их как движение. К 1895 году Эдисон и другие изобретатели разработали аппараты, которые могли проецировать действительное изображение на экран. Проектор Эдисона назвали витаскопом — по сути это был кинетоскоп с проекционной линзой. Не прошло и десяти лет, как начался расцвет киноиндустрии.

Звук впервые появился в 1927 году в фильме “Певец джаза”. В начале эры звуковых фильмов звук записывали на отдельном носителе, а позднее для него была выделена отдельная дорожка, которая шла вдоль одной стороны кинопленки. Областям сжатиям и разрежениям воздуха, которые и есть звук, соответствовали прозрачные и темные участки на звуковой дорожке. Свет от лампы накаливания направлялся на звуковую дорожку и далее на светочувствительный элемент. Фотоэлемент управлял током, поступающим в усилитель и колонки. Таким образом, когда кинопленка со звуковой дорожкой двигалась вдоль фотоэлемента, проходящий через него ток колебался вверх-вниз и динамики воспроизводили звук. Оптические звуковые дорожки привлекли внимание в 1940 г. после фильма студии Уолта Диснея “Фантазия”, где впервые появились две дорожки: в визуальной и в звуковой частях пленки.

В современных фильмах используется магнитная звуковая дорожка, смонтированная в пленку. Такой способ записи фонограмм обеспечивает самое высокое качество и гибкость, в том числе наличие нескольких отдельных звуковых каналов и применение цифровых технологий звука. Во время съемок звук записывается со многих отдельных микрофонов, а затем тщательно сводится, или микшируется, для создания окончательной магнитной фонограммы.

И наконец, в 1930 году появились цветные фильмы. Как и цветные фотографии, цветные фильмы обманом заставляют наши глаза видеть всю цветовую гамму, на самом деле стимулируя три типа наших цветовых рецепторов — красные, зеленые и синие — в нужных соотношениях. И тогда наш мозг распознает исходные цвета, и мы воспринимаем их такими, какими они были в первоначальной сцене.

В первых цветных фильмах используются не все цвета аддитивной системы. Вместо трех основных цветов там присутствуют более примитивные сочетания двух. В этих фильмах одновременно записывались два отдельных кинокадра, причем каждый фиксировал свой диапазон световых волн. Например, в технологии “Техниколор” красно-оранжевые цвета записывались на одной пленке, а зелено-синие — на другой.

Негативные изображения с этих пленок перепечатавали на новые пленки, где они давали уже позитивные изображения. Позитивные изображения тонировались цветными красителями, так что кинопленка с записью красно-оранжевого света становилась красно-оранжевой, а пленка с записью зелено-синего света — зелено-синей. Две пленки затем накладывали друг на друга, спрессовывали, и при воспроизведении получившаяся кинолента давала почти полный спектр естественных цветов. Хотя для того, чтобы человек мог видеть полный спектр видимых цветов,

необходимо три основных цвета, двуцветная система оказалась достаточно эффективна, чтобы внушить нам, будто мы видим почти всю цветовую гамму.

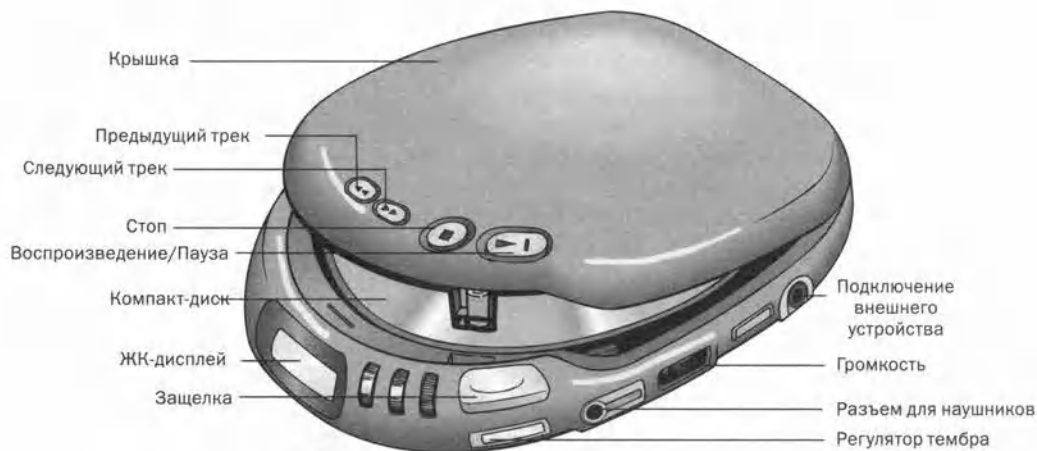
Тем не менее двуцветная система была неудобной, дорогой и некоторые цвета воспроизвести не могла. В конце концов технологию "Техниколор" сменили пленки "Кодахром" (*Kodachrome*), которые записывают и воспроизводят все три основных цвета одновременно на одной пленке. Подобные трехцветные кинопленки, как и фотопленки, состоят из нескольких тонких светочувствительных слоев на прозрачной пластиковой подложке. Чтобы получить пригодную для демонстрации проекционную пленку, негатив отснятой пленки печатается на другой цветной негативной пленке, таким образом создается позитивная копия. Эта пленка окрашена красным там, где в сцене съемки присутствовал красный свет, синим — где синий, и зеленым — где зеленый.

Демонстрация с пленки, однако, постепенно заменяется видеопроекцией, даже в кинотеатрах. Вместо проецирования света, прошедшего через пленку, современные проекторы используют электронные источники изображения. В первых видеопроекторах в качестве источников изображения использовались электронно-лучевые трубки. Свет, производимый кинескопами, проецировался на удаленный экран. К сожалению, из-за недостаточной яркости цветных кинескопов для проекторов были пригодны только черно-белые. В цветном видеопроекторе имелись три дорогих черно-белых кинескопа, каждый со своим цветовым фильтром, и три массивных, тщательно подобранных объектива, которые формировали на экране единое цветное изображение. Добиться точного наложения на экране красного, зеленого и синего изображений было нелегко, поэтому проблемы с цветопередачей были обычным явлением.

В более современных проекторах используются электронные поверхности формирования изображения, которые работают как электронная пленка. Каждая из этих поверхностей содержит тысячи или миллионы пикселей. Исходное изображение на них создается посредством выборочной передачи или отражения света, сведенного в параллельный пучок при помощи дуговой лампы. Поскольку такие поверхности маленькие и очень яркие, достаточно одного небольшого объектива. Многие проекторы оснащены зум-объективами и могут регулировать размер проецируемого изображения.

Современный видеопроектор может использовать один объектив благодаря тому, что все три основных цвета идут от одного исходного изображения. В некоторых случаях в пиксели электронной поверхности встроены цветные фильтры, так что исходное изображение изначально цветное. В других случаях диск со светофильтрами стремительно вращается на пути светового потока проектора, так что проектор работает попеременно с красным, зеленым и синим светом. Когда через проектор проходит красный свет, электронная поверхность формирует картину яркости красного света. Затем она делает то же самое для зеленого света, затем для синего и возвращается к красному. Все происходит так быстро, что наши глаза не успевают среагировать.

---



## 15.2 Оптическая запись и связь

Использование света для передачи информации — идея такая же древняя, как сигнальные огни, и такая же естественная, как само зрение. Но с развитием новых источников света, оптических материалов и электроники возможности оптических информационных систем радикально расширились. Оптика и информация оказались так хорошо совместимы, что нынешняя информационная революция отчасти на их совести. В начале 1980-х появление проигрывателей для компакт-дисков буквально за одну ночь перевернуло музыкальную индустрию, а сейчас оптические волокна с поразительной скоростью связывают наш мир все теснее. В этом разделе мы рассмотрим, как оптические устройства используют свет, чтобы управлять информацией.

### Цифровая звукозапись

Аналоговые методы царили в звукозаписи на протяжении почти столетия, но меньше чем за одно поколение их вытеснили цифровые технологии. Все дело было в качестве звука. Аналоговая запись, в которой колебания плотности (то есть звук в воздухе) представляются в виде непрерывной физической величины, подвержена влиянию шумовых помех, износу и имеет массу других недостатков. Пластинки и аналоговые магнитофонные записи просто не в состоянии обеспечить идеальный звук.

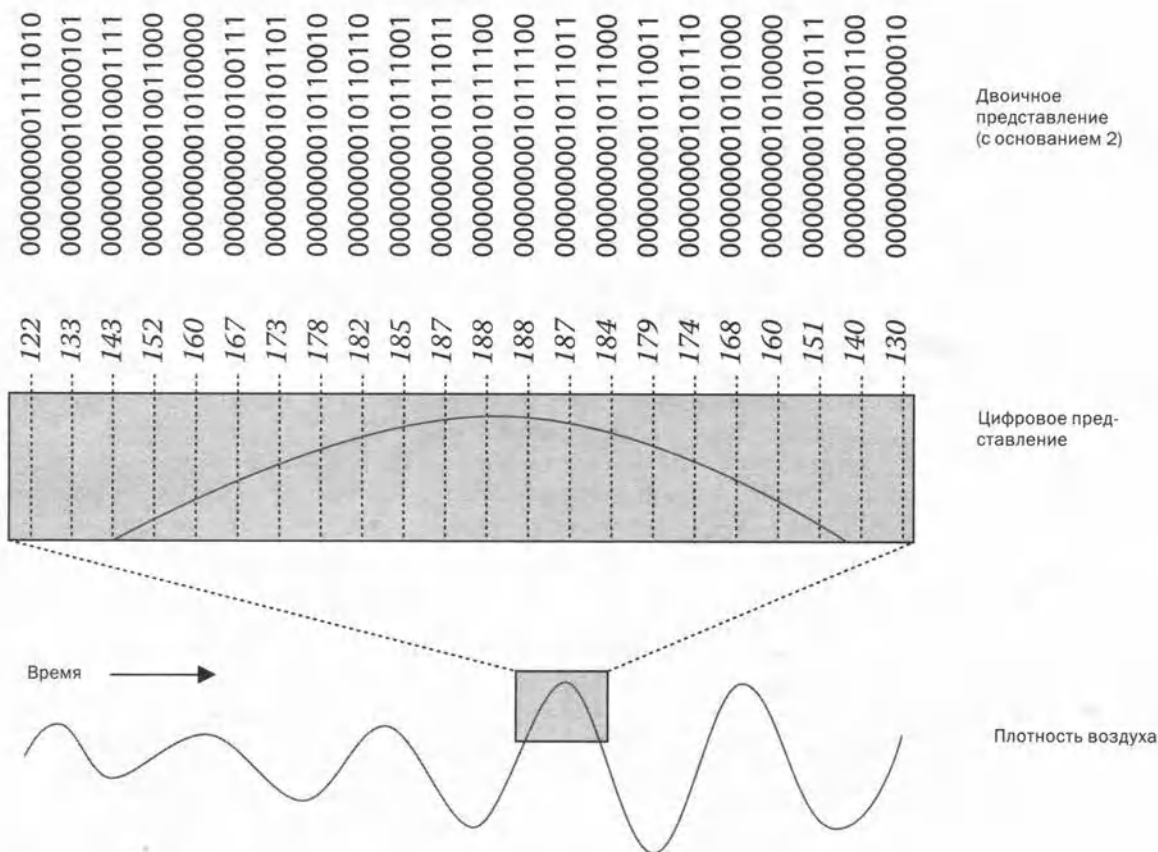
В отличие от них, цифровые записи, можно сказать, близки к совершенству. В цифровой технологии звук представляется в цифровом виде, причем для количественного измерения плотности используются многие дискретные физические величины, что обеспечивает точность записи звуковой информации, без помех и износа. Если колебания плотности измерены точно, то степень близости цифровой записи к оригиналу просто поразительна.

Как и аудиоплееры, которые мы рассмотрели в разделе 12.2, звуковые CD- и DVD-диски представляют соответствующие звуку области сжатия и разрежения воздуха в виде набора цифр (рис. 15.2.1). Эти цифры — по сути, не что иное, как результаты измерения плотности воздуха, которые постоянно фиксировались во время записи, и проигрыватель использует их для воспроизведения записанного звука.

В общепринятом для CD формате измерение плотности проводится 44 100 раз в секунду для двух независимых аудиоканалов. Эти измерения записываются на диске в двоичной форме, по 16 битов на каждое измерение. Так как плотность воздуха может и увеличиваться, и уменьшаться, биты представляют положительные и отрицательные целые числа от  $-32\,768$  до  $32\,767$ , которые, в свою очередь, показывают, насколько плотность воздуха выше или ниже средней плотности. Измерения плотности в формате 16 бит достаточно для почти идеального воспроизведения как громкой, так и тихой музыки\*.

\* Сейчас используют форматы 24 бита и даже 32 бита с частотой дискретизации 96 000 и даже 192 000 Гц. Многие люди, не будучи профессиональными музыкантами, легко различают качество записи с 16 и 24 битами и 44,1 кГц и 96 кГц, если запись не сжатая.





**Рис. 15.2.1.** Звук можно представить в цифровом виде как последовательность чисел. При этом каждое число соответствует отношению плотности воздуха в определенный момент времени к его средней плотности. Эти числовые значения могут быть представлены в двоичной системе, с использованием двух цифр, 0 и 1.

На DVD, как и на CD-диск, информация записывается в цифровом виде. Но DVD — это уже более новая и, следовательно, более сложная технология. Здесь можно выбирать частоту измерений (количество битов на одно измерение) и количество каналов. В обычном DVD может быть пять аудиоканалов: левый, центральный и правый фронтальные каналы, а также левый и правый тыловые каналы. Три фронтальных канала измеряют плотность 96 000 раз в секунду и выделяют 24 бита на каждое измерение, два тыловых — 48 000 раз в секунду при 20 битах на измерение. Все эти стандарты, биты и каналы содержат гораздо больше информации, чем хранится на компакт-диске, но DVD-диск перед сохранением сжимает эту информацию. Обычные CD, напротив, информацию не сжимают, хотя в некоторых более современных форматах (например, mp3) используются технологии сжатия.

В любом случае измерения плотности воздуха не просто записываются одно за другим на поверхности диска. Перед сохранением эти данные существенно преобразуются и перегруппировываются. Перегруппировка позволяет проигрывателю качественно воспроизводить звук, даже если диск не может быть прочитан полностью. Как мы вскоре увидим, чтение этих дисков является технологически очень непростой задачей, и здесь много подводных камней. Чтобы звук (и видео) могли наверняка воспроизводиться полностью, без пауз и сбоев, цифры кодируются. Производится резервирование данных, так что даже если одна копия числа неразборчива, на том же отрезке спиральной дорожки имеется достаточно доступной информации, чтобы полностью воссоздать недостающее число. Подобное дублирование информации сокращает время звучания как CD-, так и DVD-дисков, но зато делает их надежнее.

Такая схема кодирования страхует CD- и DVD-диски почти от всех, кроме разве что самых тяжелых, проблем воспроизведения. В принципе, даже если вы проведете на диске от центра к краю царапину шириной 2 мм, проигрыватель

все равно будет в состоянии качественно воспроизвести звук (и видео). Гораздо опаснее повреждение вдоль спиральной дорожки. Если плеер не может прочесть большой отрезок одной дорожки, он не в состоянии восстановить информацию. Вот почему очищать диски от пыли и грязи нужно от центра к краям.

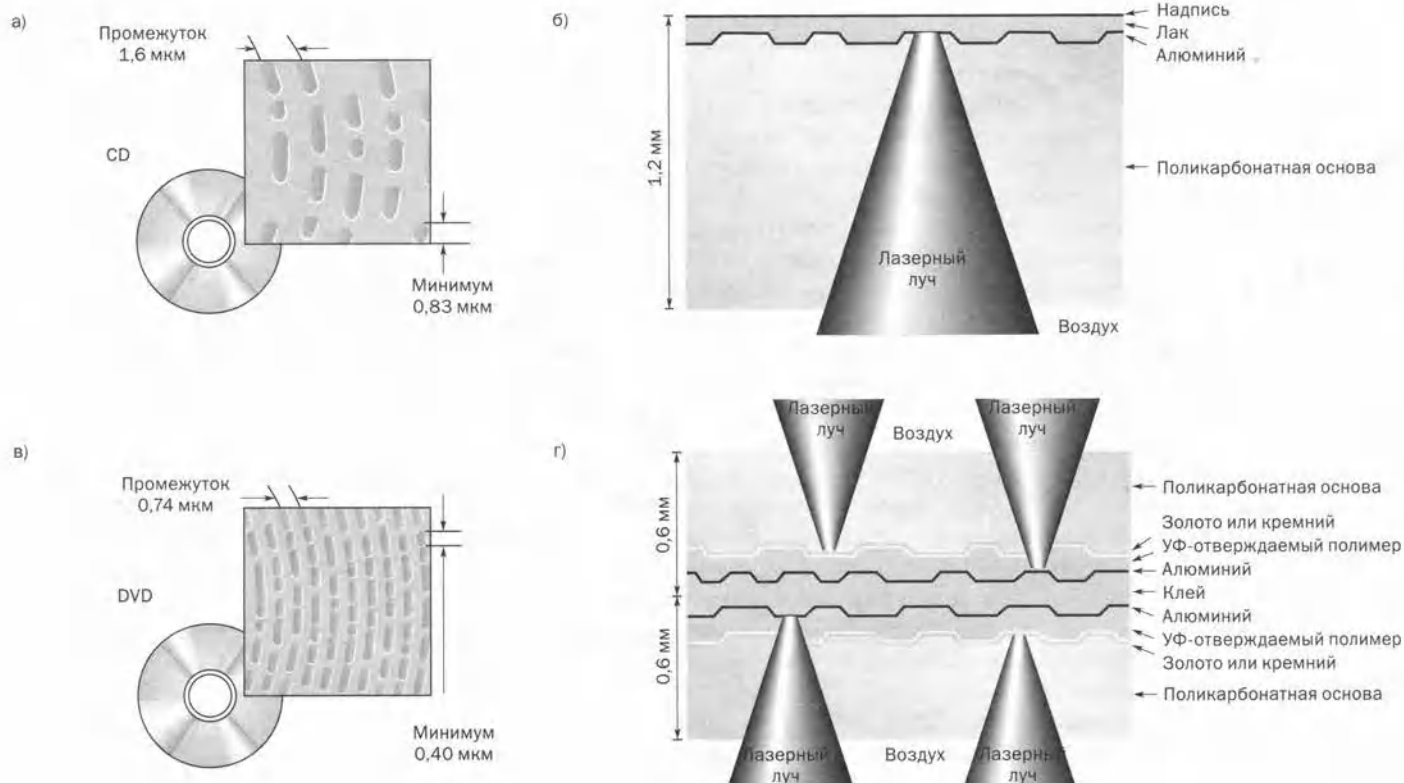
## Устройство CD- и DVD-дисков

Диаметр стандартных CD- и DVD-дисков составляет 120 мм (4,72 дюйма), толщина — 1,2 мм (0,05 дюйма). Одна сторона компакт-диска гладкая, другая — многослойная: слой тонкой алюминиевой пленки, слой защитного лака, поверх которого печатается информация о содержимом диска (рис. 15.2.2, б). В отличие от CD, DVD-диск состоит из двух спрессованных прозрачных пластиковых дисков толщиной 0,6 мм, с одним, двумя или четырьмя отражающими слоями алюминия, золота или кремния между ними (рис. 15.2.2, г). Чем больше в DVD слоев, тем больше информации он может хранить.

Отражающие слои являются рабочими записывающими поверхностями. Они настолько тонкие, что пропускают некоторое количество света. Для DVD-дисков с золотыми или кремниевыми слоями эта полупрозрачность имеет значение, потому что позволяющей считывающей информации оптической системе передавать свет через полупрозрачный слой алюминиевому слою позади него. Но даже алюминиевые слои в какой-то степени пропускают свет. В то время как в ответ на воздействие электрического поля света электроны алюминия приобретают ускорение и обычно полностью отражают этот свет, в слое толщиной 50–100 нм для этого просто не хватает электронов, поэтому часть света проходит сквозь слой.

Отражающие слои не идеально гладкие. Каждый из них имеет на поверхности узкую спиральную дорожку (рис. 15.2.2, г). Дорожка представляет собой ряд микроскопических углублений — питов, длиной от 0,83 мкм у CD-дисков и от 0,4 мкм у DVD. Расстояние между соседними витками спиральной дорожки составляет всего 1,6 мкм на компакт-диске и 0,74 мкм на DVD (рис. 15.2.2, а, в). Размеры питов и “лендов” — плоских промежутков между питами — используются для представления чисел. При вращении диска проигрыватель измеряет питы и ленды и преобразует их длину в числа, звук и видео.

**Рис. 15.2.2.** (а, б) Компакт-диск представляет собой прозрачную пластиковую основу, на одну сторону которой нанесен тонкий слой алюминия. В алюминиевом слое имеются крошечные углубления — питы, которые считываются лазерным лучом с длиной волны 780 нм. (в, г) DVD-диск содержит до четырех слоев алюминия, золота или кремния, зажатых между двумя прозрачными пластиковыми подложками. Золотые или кремниевые слои полупрозрачны, они частично отражают свет. В этих слоях питы считываются лазерным лучом с длиной волны 650 нм. Луч может сфокусироваться либо на полупрозрачном слое, или, при прохождении через этот слой, на алюминиевом слое под ним.



Размеры питов и лендов не были выбраны произвольно. Поскольку электромагнитные волны не могут обнаруживать структуры, размеры которых намного меньше длины волны (см. раздел 13.2), длина волны лазерного луча ограничивает минимальный размер деталей на диске. У CD-плееров длина волны этого луча составляет 780 нм в воздухе и 503 нм в поликарбонатном пластике. Таким образом, она достаточно мала, чтобы легко распознавать питы на компакт-диске. У DVD-плееров длина волны лазерного луча составляет от 635 и 650 нм в воздухе и от 410 до 420 нм в пластике — ровно столько, сколько нужно, чтобы без труда обнаружить питы на DVD-диске. Уменьшение длины волны внутри диска происходит потому, что показатель преломления поликарбонатной основы равен 1,55 — то есть скорость света в пластике уменьшается по сравнению со скоростью в вакууме в 1,55 раза. Во столько же раз уменьшается длина волны.

Проигрыватель обнаруживает пит по отражению света от диска и измеряет, какая часть света отражается. Когда сфокусированный лазерный луч проходит над углублением, отражение становится менее ярким, отчасти потому, что вогнутый пит рассеивает свет во всех направлениях, а отчасти — из-за интерференционных эффектов. Свет, который отражается от дна ямки-пита, проходит больший путь, чем свет, отразившийся от ровной поверхности вокруг пита, поэтому электрические и магнитные поля двух волн сдвигаются относительно друг друга. Глубина пита выбрана таким образом, чтобы две отраженные волны находились приблизительно в противофазе, создавая деструктивную интерференцию. В итоге датчики света проигрывателя способны обнаружить сравнительно слабый свет, когда лазерный луч находится над питом.

В качестве источника света CD- и DVD-плееры используют лазерный диод. Для первых стандарт волны 780 нм был принят в 1980 году, когда 780-нанометровые инфракрасные лазерные диоды были надежны, но все еще довольно дороги. С тех пор технология шагнула вперед, и, благодаря разработке недорогих красных лазерных диодов, появился стандарт для DVD 635–650 нм. Новые стандарты следуют за технологией, поэтому постепенно начинают появляться оптические системы записи на основе синего, фиолетового и ультрафиолетового лазерных диодов\*.

## Оптическая система CD- и DVD-проигрывателей

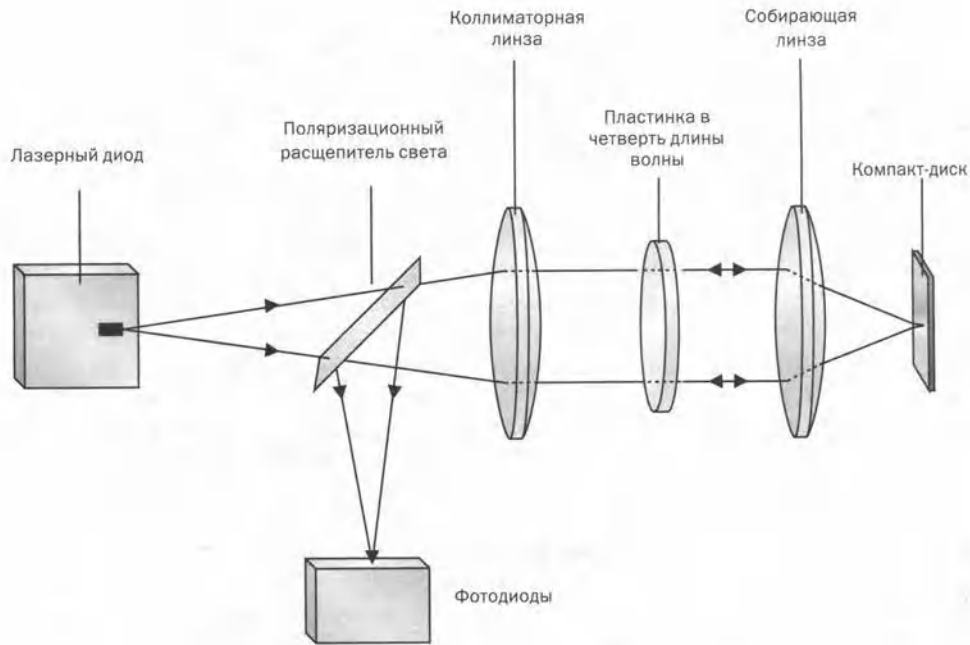
Оптическая система CD- и DVD-плееров измеряет длину микроскопических питов, проходящих мимо нее на вращающемся диске. Этот процесс требует невероятной точности. Проигрыватель должен не только сфокусировать лазерный луч точно на отражающем слое, но и следовать вдоль движущейся спиральной дорожки. Сам диск не может быть ни идеально ровным, ни идеально круглым, поэтому во время воспроизведения плееру приходится постоянно приспосабливаться. Оптическая система должна держать лазерный луч сфокусированным на отражающем слое (автофокусировка) и точно отслеживать спиральную дорожку (автотрекинг). Эти автоматические процессы представляют собой прекрасный пример использования обратной связи.

Схематическое устройство обычного CD- или DVD-плеера показано на рис. 15.2.3. На пути к отражающему слою диска свет от лазерного диода проходит через несколько оптических элементов. Он точно фокусируется на этом слое, где освещает только одну звуковую дорожку. Часть света отражается от слоя и возвращается, вновь проходя через оптические элементы. В конце отраженный свет при помощи специального зеркала, которое называется поляризационным расщепителем, поворачивает под прямым углом и фокусируется на детекторе — фотодиодной панели или матрице. Плеер измеряет проходящие через детектор электрические токи и использует эти измерения как для получения данных с диска, так и для управления системами фокусировки и трекинга.

Давайте рассмотрим по очереди каждый элемент оптической системы. Выйдя из лазерного диода, свет проходит через поляризационный расщепитель. Это устройство анализирует его поляризацию. Как мы узнали из раздела 14.1, свет с различной поляризацией при падении под углом на прозрачную поверхность по-разному отражается. В данном случае поляризованный свет от лазера проходит через поверхность, наклоненную под углом 45°, но свет с другой поляризацией отражается. Специальное покрытие расщепителя дает возможность почти идеально разделить две поляризации.

\* Новый стандарт *Blu-ray disc*, или BD, относится к 2006 году; тогда же выпущены первые диски. В них используется сине-фиолетовый лазер с длиной волны 405 нм. Однослойный диск Blu-ray может хранить 25 GB информации. Стандарт выиграл соревнование с конкурирующим HD DVD и сейчас является монополистом.

**Рис. 15.2.3.** В оптической системе CD- и DVD-проигрывателей свет от лазерного диода проходит через поляризационный расщепитель света, коллиматорную линзу, пластинку в четверть длины волны и собирающую линзу, а затем фокусируется на отражающем слое внутри диска. Отраженный свет поворачивается на  $90^\circ$  на расщепителе и фокусируется на много-секционном фотодиоде (фотодиодной матрице).



Пройдя через расщепитель, свет от лазерного диода быстро расходится. Это не означает, что лазерный диод не работает или плохо спроектирован; это значит, что световая волна, выходящая из маленького отверстия, естественным образом расходится в стороны, как рябь на пруду. Такое расхождение, или дифракция, случается всякий раз, когда световая волна ограничивается в размерах, проходя через узкое отверстие. Чем меньше отверстие, тем больше расхождение. Поскольку излучающая поверхность лазерного диода в сущности представляет собой очень небольшое отверстие, лазерный луч, выйдя из диода, быстро расходится. Чтобы остановить это расхождение, проигрыватель использует собирающую линзу, установленную после расщепителя. К этому моменту пучок света уже настолько широк, что дополнительное расхождение незначительно. Пройдя через линзу, пучок света становится почти параллельным и поддерживает почти постоянный диаметр.

Затем лазерный луч проходит через пластинку в четверть длины волны. Это замечательное устройство выполняет половину задачи по преобразованию горизонтально поляризованного света в вертикально поляризованный, и наоборот. Горизонтально либо вертикально поляризованный свет называют плоскополяризованным, потому что электрические поля такого света при движении в пространстве всегда колеблются в одной плоскости. Но пластинка в четверть длины волны превращает плоскополяризованный свет в свет с круговой поляризацией. Мы уже сталкивались с круговой поляризацией, говоря об FM-радио. Электрическое поле света с круговой поляризацией вращается вокруг оси, показывающей направление распространения света.

Далее свет проходит через линзу, которая фокусирует его на отражающем слое диска. На пути к отражающему слою свет проникает в слой пластика. В точке входа диаметр луча все еще более  $0,5$  мм, что объясняет, почему пыль или отпечатки пальцев на поверхности диска не вызывают особых неполадок. Несмотря на то, что загрязнение может блокировать часть лазерного пучка, большая его часть все-таки продолжает путь к отражающему слою.

На границе отражающего слоя свет очень точно фокусируется. Хотя кажется, что при этом все лучи должны сходиться в одной точке на поверхности слоя, на самом деле образуется пятно с диаметром, примерно равным одной длине волны. Размер пятна ограничен волновой природой света. Дело в том, что, как бы вы ни старались сфокусировать свет, вы не можете получить пятно, которое было бы намного меньше, чем длина световой волны. Вместо этого лучи образуют сужение — так называемую перетяжку пучка, а затем расходятся (**рис. 15.2.4**). Диаметр перетяжки пучка — около одной длины волны, протяженность — несколько длин волн, в зависимости от  $f$ -числа собирающей линзы. Так как длина перетяж-

ки меньше 2 мкм, система автофокусировки плеера должна очень точно держать линзу на нужном расстоянии от отражающего слоя.

Это фундаментальное ограничение максимальной степени фокусирования луча является еще одним примером дифракции; фокусирующая линза обрезает часть световой волны и поэтому неизбежно вызывает расхождение. Однако и достижение теоретического предела фокусировки требует точных расчетов и скрупулезного изготовления оптических элементов. В то время как большинству других оптических систем не удается подойти к предельным значениям, оптическая система CD- и DVD-проигрывателей в этих условиях добивается наилучшего результата. Их оптика почти идеальна, она, как говорят, ограничена дифракцией.

Количество отражающегося от слоя света зависит от того, попадает ли лазерное пятно на пит. Отраженный свет проходит через оптическую систему в обратном порядке. Собирающая линза играет роль коллиматора, параллельный пучок отраженного света затем повторно проходит через пластинку в четверть длины волны. На этом этапе пластинка завершает уже начатую работу: свет вновь становится плоскополяризованным, но его поляризация теперь противоположна той, с которой он вышел из лазера. Горизонтально поляризованный свет теперь приобретает вертикальную поляризацию, и наоборот.

Затем отраженный свет проходит через коллиматорную линзу, которая в этом направлении работает как собирающая, после чего попадает на поляризационный расщепитель. Так как поляризация света изменилась на противоположную, расщепитель уже не дает лучу пройти прямо через него. Вместо этого расщепитель поворачивает отраженный луч на  $90^\circ$  и направляет его на фотодетектор. Такая сложная схема перенаправления решает две задачи. Во-первых, большая часть светового потока не может пройти от лазерного диода до детектора. Во-вторых, отраженный свет не может вернуться к лазерному диоду, где произошло бы его усиление, и в результате — сбой в работе лазера.

Свет фокусируется на матрице фотодиодов. Фотодиоды дают плееру возможность распознавать питы по интенсивности отраженного света, а кроме того, помогают оценить правильность расположения линзы по отношению к питам. Для простоты на рис. 15.2.3 не показаны оптические элементы, отвечающие за автофокусировку и автотрекинг. Тем не менее именно благодаря этим элементам картина света, попадающего на фотодиодную матрицу, показывает, нужна ли корректировка положения линзы, а если нужна, то в какую сторону. Линза соединена с проволочными катушками, подвешенными возле постоянных магнитов. Изменяя протекающие через катушки токи, проигрыватель использует силу Лоренца для того, чтобы быстро перемещать линзу и удерживать ее в нужном положении относительно диска.

## Оптические волокна

Оптическое воспроизведение заранее записанных дисков очень удобно, когда речь идет о музыке и фильмах, но от плееров мало пользы, когда вам нужна самая свежая информация. Для интернета и Всемирной паутины необходимы каналы связи, работающие со скоростью света. Но и в этом случае оптика и свет играют огромную роль. На сегодняшний день самый быстрый способ отправить огромное количество информации — использовать оптические волокна.

Оптическое волокно представляет собой стеклянный трубопровод, в котором свет передается от одного конца к другому. Почти каждый фотон, который входит в один конец волокна, мгновением позже выходит из другого. Простейшее оптическое волокно состоит из двух различных стекол: твердой сердцевины из одного вида стекла, окруженной оболочкой из другого стекла. Оба стекла настолько прозрачны, что свет может почти без потерь пройти по волокну много километров. Для сравнения посмотрите сквозь срез обычного оконного стекла — вы увидите, насколько темным выглядит стекло. Оно непригодно для оптических волокон, потому что поглощает слишком много света. Оптоволокно же делают из самых прозрачных видов стекла, какие только бывают.

Но если оба стекла почти полностью прозрачны, что мешает свету выйти за пределы трубки? Ответ: явление, известное как полное внутреннее отражение. На пути от сердечника к внешней стеклянной оболочке свет полностью отражается и потому не может выйти наружу.



Рис. 15.2.4. Когда собирающая линза фокусирует лазерный пучок, свет не сходится в какой-то одной точке. Вместо этого он образует перетяжку с диаметром, примерно равным длине световой волны.

\* На самом деле, когда свет попадает на границу двух сред с разными показателями преломления, часть света отражается, а часть преломляется. Процент преломленного и отраженного света полностью определяется его углом падения и поляризацией. При полном внутреннем отражении весь свет отражается. Так что частичное отражение света существует и без полного внутреннего отражения, но на рисунке оно не показано.

**Рис. 15.2.5.** Когда свет, распространяющийся в одной среде, входит в другую среду с более низким показателем преломления, он отклоняется в сторону границы между этими средами. Если угол падения света совсем маленький, свет будет отклоняться так сильно, что начнет просто отражаться от границы. Это явление называется полным внутренним отражением\*.



Полное внутреннее отражение — это крайний случай преломления. Когда свет падает на границу между двумя материалами с различными показателями преломления, преломление заставляет свет изменить направление (рис. 15.2.5). Если среда, в которую входит свет, имеет меньший показатель преломления, чем та, из которой он выходит, свет отклоняется от линии, перпендикулярной границе. Степень этого отклонения зависит от показателей преломления обеих сред и от угла, под которым свет падает на границу между ними\*\*. При достаточно больших углах падения свет может проникнуть в другой материал. Но если угол падения мал, свет вообще не входит в другую среду. Вместо этого он полностью отражается от границы раздела. Фактически полное внутреннее отражение гораздо эффективнее обычного металлического зеркала.

\*\* В оптике углы падения, преломления и отражения всегда отсчитываются от нормали к границе раздела двух сред, то есть нормальному падению соответствует нулевой угол падения, а касательному — угол в 90 градусов. Автор пользуется своим собственным определением угла падения.

Чтобы удержать свет внутри сердцевины оптического волокна, стекло, из которого изготовлена сердцевина, должно иметь более высокий показатель преломления, чем оболочка. Когда свет в сердечнике с высоким показателем преломления падает на границу с оболочкой с низким показателем преломления, он испытывает полное внутреннее отражение и возвращается в сердцевину (рис. 15.2.6, а). До тех пор пока волокно не слишком сильно изгибается, свет вновь и вновь отражается внутри сердцевины и не может выйти за ее пределы. В результате луч света, направленный в сердцевину с одного конца отрезка волокна, проследует вдоль него до другого конца.

Но при относительно большом (50 мкм и более) диаметре волокна возникает проблема. Световые лучи, путешествующие по волокну под слегка различающимися углами, при этом проходят вдоль волокна разные расстояния. Свет, направленный по центру волокна, редко отражается, и ему требуется меньше времени, чтобы пройти весь участок, чем свету, который на том же пути многократно отражается. Так как в широком волокне для распространения луча света существует много возможных путей, или "мод", короткий импульс света при прохождении через такое волокно растягивается во времени (рис. 15.2.6, а). Это уширение импульса серьезно ограничивает скорость передачи информации по многомодовому волокну.

Чтобы сократить уширение импульса, сердцевина высокопроизводительного оптического волокна должна иметь переменный, или градиентный, показатель преломления. Стекло сердцевины специально обрабатывается так, чтобы его показатель преломления плавно уменьшался от центра к оболочке. Вместо резкого, под углом, отражения от границы раздела материалов, в среде с градиентным показателем преломления свет по плавному, слегка изгибающемуся пути возвращается к центру сердцевины (рис. 15.2.6, б). В градиентных многомодовых волокнах различия в пройденном пути между разными модами уже не так ве-



**Рис. 15.2.6.** Свет, который пытается выйти за пределы сердцевины оптического волокна с высоким показателем преломления, испытывает полное внутреннее отражение на границе с оболочкой, имеющей низкий показатель преломления. (а) В обычном многомодовом волокне для распространения импульса света существует много возможных путей. При этом вероятно растягивание или уширение импульса во времени. (б) Сердцевина с переменным (или градиентным) показателем преломления дает меньшее уширение, так как процесс отражения становится более плавным. (в) Наименьшее уширение импульса, однако, происходит в одномодовом волокне. Маленький диаметр сердцевины этого волокна обуславливает только одну возможную моду распространения света, так что небольшое уширение происходит лишь за счет обычной дисперсии.

лики, и короткий импульс света на отрезке умеренной длины гораздо меньше растягивается.

Но в случае очень длинных многомодовых волокон даже небольшие различия в пройденном пути суммируются и короткие импульсы уширяются. Поэтому самыми эффективными оптическими каналами являются одномодовые волокна. В этих волокнах используется сердцевина очень малого диаметра с градиентным показателем преломления, так что становится возможной только одна мода — непосредственно по центру волокна (рис. 15.2.6, в). Диаметр сердцевины в этом случае обычно составляет всего 9 мкм. Проходя по такой узкой сердцевине, импульс света почти не уширяется во времени.

То небольшое уширение, которое все-таки происходит в одномодовом волокне, не связано с различием световых путей; его причина — обычная дисперсия в стекле. Чтобы нести информацию, световая волна должна меняться во времени и, следовательно, должна иметь определенный диапазон частот и длин волн. Бокковые полосы, с которыми мы уже сталкивались, говоря о телевидении, появляются и в оптической связи. Как всегда, более короткие волны распространяются медленнее, чем длинные, поэтому импульсы растягиваются во времени. Чтобы минимизировать влияние дисперсии, высокоскоростные оптические волокна работают на длинах волн, которые уменьшают дисперсию. Кроме того, выбираются волны такой длины, которая минимизирует поглощение света стеклом и связанные с этим потери. Обоим этим требованиям удовлетворяет длина волны 1550 нм. В так называемых волокнах со смещенной дисперсией для дальней оптической связи часто используется эта инфракрасная волна.

## Оптическая связь

Типовой передатчик оптической связи для генерации коротких импульсов света использует лазерный диод с длиной волны 1550 нм. Эти импульсы несут информацию от передатчика к удаленному приемнику. Передатчик формирует импульсы, меняя проходящий через лазерный диод ток. Выходящий из лазерного диода свет фокусируется на открытой сердцевине одномодового оптического волокна и проходит вдоль волокна до его противоположного конца. На выходе свет собирается линзой и фокусируется на фотодиоде приемника. Каждый импульс света вызывает импульс тока, протекающего через фотодиод, что позволяет приемнику начать обработку информации.

Лазерный диод и одномодовое оптическое волокно могут без существенных ошибок передавать миллиарды бит данных в секунду на расстояния 50–100 км. На более длинных дистанциях свет постепенно поглощается стеклом, что сни-

жает надежность получения информации. Простейшее решение этой проблемы — получать данные до того, как свет ослабеет, и затем повторно ретранслировать их при помощи другого лазерного диода.

Но вместо того чтобы прерывать оптическую передачу приемниками и ретрансляторами, некоторые системы дальней связи используют эрбиевые волоконные усилители (EDFA). EDFA — это участок оптического волокна, сердцевина которого содержит около 0,01% ионов эрбия. Когда на него поступает свет с длиной волны 980 или 1480 нм, он работает как лазерный усилитель для света с длиной волны 1550 нм. Когда ослабленные импульсы света от обычного длинного волокна проходят через волоконный усилитель, усилитель удваивает фотоны и увеличивает яркость импульсов. Усиленные импульсы продолжают путь по обычному волокну, а затем вновь усиливаются. Часто в подводные оптические кабели примерно через каждые 50 км вставляют состыкованные с основным волокном участки волоконных усилителей. Эти усилители позволяют свету непрерывно проходить тысячи километров с одного берега океана до другого.

Чтобы получить максимальную отдачу от одного оптического волокна, многие системы связи используют несколько лазерных диодов, работающих на нескольких различных диапазонах длин волн в районе 1550 нм. Свет от этих диодов объединяется и фокусируется в волокно. Когда свет выходит из противоположного конца волокна, различные диапазоны длин волн снова разделяются и направляются на отдельные приемники. Различные диапазоны длин волн аналогичным образом позволяет одному волокну передавать гораздо больше информации, чем оно передавало бы от одного лазера. Самое замечательное, что эрбиевый усилитель может усиливать сразу все эти каналы, потому что ионы эрбия способны копировать широкий диапазон длин волн.

## Двулучепреломляющие поляризационные расщепители пучка

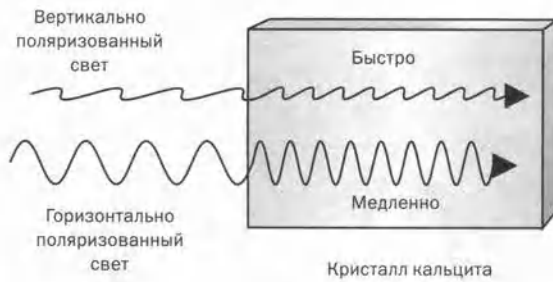
В первых CD-плеерах поляризационный расщепитель пучка был сделан из двух прозрачных кристаллов минерала кальцита (одна из форм карбоната кальция). Из тщательно вырезанных и отшлифованных кристаллов изготавливают две призмы, которые в готовом расщепителе почти касаются друг друга. В то время как свет одной плоскости поляризации без труда переходит от одной призмы к другой, свет противоположной поляризации под прямым углом отражается от зазора между призмами.

Расщепитель луча работает благодаря двум физическим явлениям: двойному лучепреломлению и полному внутреннему отражению. Двойное лучепреломление происходит, когда материал имеет разные показатели преломления для двух видов плоскополяризованного света. В кальците и подобных ему кристаллах молекулы расположены упорядоченно, как яблоки на полке в магазине. Такая структура молекул по-разному реагирует на вертикальные и горизонтальные электрические поля. Если одно из этих полей сильнее электрически поляризует кристалл, чем другое, кристалл будет по-разному реагировать на вертикально и горизонтально поляризованный свет и будет иметь для каждого из них свой показатель преломления. Плоскополяризованный свет, который сильнее влияет на кристалл, будет распространяться в нем медленнее, чем свет противоположной поляризации.

Кальцит проявляет свойство двойного лучепреломления. Показатель преломления для одной плоскости поляризации света равен 1,70. Этот свет проходит через кристалл относительно медленно, и, как говорят, он поляризован вдоль медленной оси кристалла (рис. 15.2.7). Показатель преломления для другой плоскости поляризации составляет 1,52. Такой свет распространяется относительно быстро и называется поляризованным вдоль быстрой оси кристалла. Кальцитовые призмы поляризационного расщепителя пучка вырезаны так, чтобы горизонтально и вертикально поляризованный свет проходил через них с разной скоростью. При входе в зазор между двумя призмами свет с разной поляризацией и преломляется по-разному.

Свет, поляризованный вдоль быстрой оси кристалла, при выходе из первой призмы значительно преломляется, но все же ему удастся пересечь воздушный





**Рис. 15.2.7.** Свет различной плоской поляризации распространяется в кальците с разной скоростью. Изображенный на рисунке кристалл был вырезан и ориентирован так, чтобы горизонтально поляризованный свет распространялся быстрее, чем вертикально поляризованный.

зазор и войти во вторую призму. Свет, поляризованный вдоль медленной оси кристалла, так сильно преломляется, пытаясь выйти из первой призмы, что вообще не покидает ее. Этот свет идеально отражается от поверхности призмы в результате полного внутреннего отражения.

Поляризационный расщепитель света устроен так, что свет с одной плоскостью поляризации способен преодолеть воздушный зазор между кальцитовыми призмами, а свет с другой поляризацией испытывает полное внутреннее отражение. Свет, поляризованный вдоль быстрой оси кальцита, проходит прямо через расщепитель с минимальными искажениями. Но свет, поляризованный вдоль медленной оси кальцита, поворачивает на  $90^\circ$  и выходит из первой призмы через отдельную поверхность. В проигрывателе для компакт-дисков свет от лазерного диода проходит прямо к поверхности компакт-диска, в то время как возвращающийся от диска свет имеет другую поляризацию и направляется к фотодиодам. Хотя во всех современных системах оптических дисков используются недорогие тонкопленочные поляризационные расщепители, двулучепреломляющие расщепители все еще применяются в высокомоощных лазерных системах и научно-исследовательских лабораториях.

Двойное лучепреломление — явление, вполне обычное для кристаллов. Оно также проявляется в прозрачных стеклах и пластмассах как результат внутреннего напряжения. Двулучепреломление можно вызвать случайно или целенаправленно путем неравномерного охлаждения или нагревания, а также при закаливании стекла или пластика. Тогда материал будет по-разному преломлять или отражать свет различной поляризации. Внешне это проявится в пятнышках или полосках, если рассматривать материал в поляризованном свете. Отражение от закаленных задних стекол автомобилей нередко бывает пятнистым, если смотреть при частично поляризованном естественном свете, особенно если надеть поляризационные солнцезащитные очки. Стеклодувы и инженеры часто используют поляризованный свет, чтобы обнаружить двойное лучепреломление и таким образом выявить участки с внутренним напряжением.

## Граммофонная звукозапись

Задолго до появления CD- и DVD-дисков, а также аудиопроигрывателей люди наслаждались прослушиванием пластинок. Почти весь XX век в мире звукозаписи царили грампластинки. Это был удобный и недорогой способ сохранить и воспроизвести звук. Работа грампластинки основывается на принципе, открытом Томасом Эдисоном: возвышения и углубления на поверхности можно использовать для представления сжатия и разрежения воздуха. Хотя материалы, из которых делают пластинки, с годами менялись, а записи из моно превратились в стерео, основные принципы граммофонной записи оставались прежними.

На поверхности грампластинки вырезана узкая канавка, она же дорожка (рис. 15.2.8). Дорожка образует единую непрерывную спираль от внешнего края пластинки к ее центру. Когда пластинка вращается вместе с поворотным кругом, вдоль середины канавки скользит тщательно отшлифованная алмазная игла звукоснимателя. С обеих сторон иглу поддерживают боковые поверхности дорожки. Неровности канавки влияют на положение иглы и заставляют ее колебаться.

Пластинка представляет звук в виде неровностей двух сторон канавки. Одна сторона представляет звук для левого стереодинамика, другая — для правого.

**Рис. 15.2.8.** Звуковая дорожка пластинки в разрезе. Пластика вращается, и игла скользит вдоль канавки. Неровности на боковых поверхностях канавки двигают иглу в двух независимых направлениях. Они используются для управления акустических конусов динамиков и таким образом для воспроизведения стереозвuka.

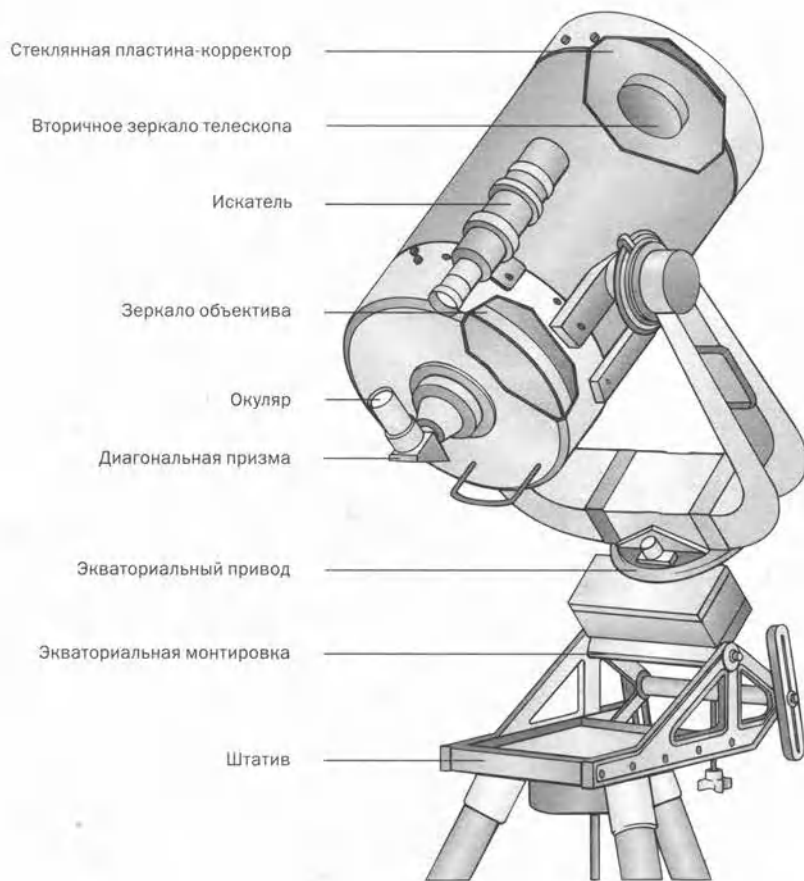


Поскольку масса иглы очень мала, а силы, действующие между ней и поверхностями канавки, — велики, игла легко следует за выпуклостями и впадинами на обеих поверхностях. Игла связана с постоянным магнитом, который перемещается внутри двух катушек индуктивности. При движении иглы и магнита число линий магнитной индукции, проходящих через катушки, меняется, и в катушках возникают электрические токи. Эти токи усиливаются и питают динамики. Вот, пожалуй, и все, что следует сказать о процессе проигрывания грампластинок.

Однако у системы грамофонной записи много недостатков. Самое главное, все, что так или иначе попадает на открытую поверхность пластинки, снижает качество звука. Пыль и отпечатки пальцев могут накапливаться в канавках и изменять звучание. Пластики приходится часто чистить и при этом следить за тем, чтобы не добавить новых загрязнений и не повредить поверхность.

Сами грампластики довольно непрочны и изнашиваются в процессе эксплуатации. Качество звучания снижается с каждым проигрыванием, так как трение скольжения между очень жесткой иглой и канавкой постепенно изнашивает поверхность пластинки. Еще один повод для беспокойства — царапины, которые вызывают резкое ускорение иглы, в результате чего возникают шумы. Более того, неудачная царапина может разрушить барьер между соседними витками спиральной канавки так, что игла перепрыгнет с одной на другую. Выражение “как заезженная пластинка” относится к полузабытым временам, когда поцарапанная пластинка снова и снова проигрывала один и тот же отрывок, потому что игла постоянно соскакивала на определенный участок дорожки.

Но даже если пластинка находится в отличной форме, ее звуковые возможности ограничены. Тихие звуки требуют очень маленьких движений иглы, громкие — относительно больших. Соответственно, на поверхностях канавки должны быть как большие, так и маленькие неровности, но существует физический предел того, насколько велики или малы могут быть эти механические неровности. Кроме того, пластинка не может в совершенстве разделять левый и правый стереоканалы. Неровности на левой поверхности канавки заставляют иглу перемещаться под определенным углом, в результате чего возникает звук в левом динамике. Неровности справа вызывают звук в правом динамике. Но движение иглы не может быть идеальным, и на самом деле каналы не являются полностью независимыми друг от друга. Чаще всего вы не замечаете эти перекрестные помехи между левым и правым стереоканалами, но в целом они снижают стереоэффект.



## 15.3 Телескопы и микроскопы

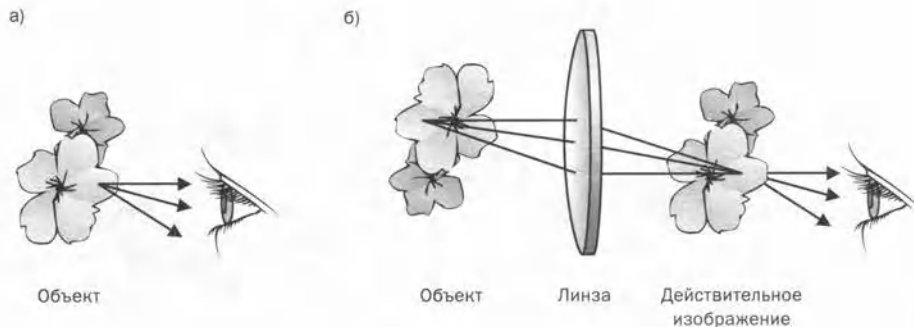
Не все, что мы хотим увидеть, доступно невооруженному глазу. Мы не можем в подробностях рассмотреть ни удаленные объекты, ни мелкие детали близких объектов. Нам нужна помощь. Чтобы увеличить и сделать более яркими удаленные объекты, мы используем телескопы, чтобы получше разглядеть близкие — микроскопы. Эти устройства выполняют противоположные задачи, но по конструкции почти одинаковы, поэтому логично рассказать о них в одном разделе.

### Фотографические и визуальные телескопы

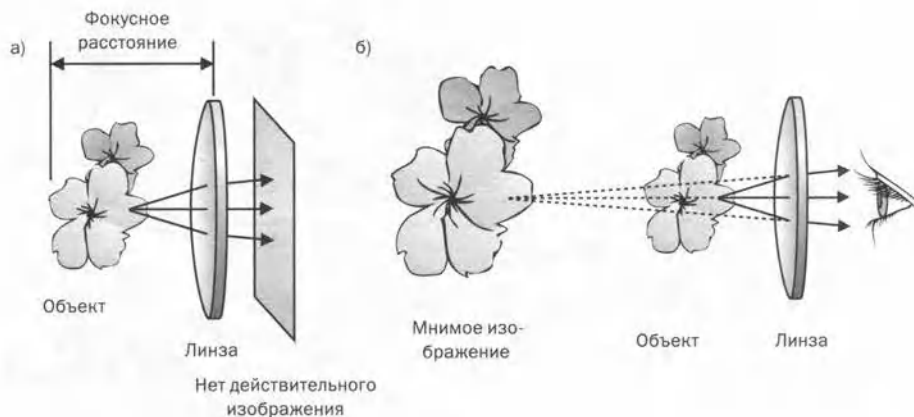
Начнем с оптических телескопов, которые формируют изображения удаленных объектов либо на датчике изображения, либо перед нашими глазами. Профессиональные астрономы в основном используют фотографические телескопы — это огромные телескопические линзы, которые создают действительные изображения звезд на фотопленке или электронном датчике изображения. Однако среди астрономов-любителей по-прежнему популярны визуальные телескопы, которые применяются и для наземных работ. Бинокуляр, в сущности, представляет собой пару визуальных телескопов, тщательно подстроенных друг к другу и снабженных устройствами на основе призм, которые переворачивают изображение. Единичный визуальный телескоп, который производит прямое, то есть неперевернутое, изображение иногда называют монокуляр.

Фотографический телескоп производит действительное изображение, в котором свет от определенной части небесной сферы собирается на определенном участке датчика изображения. А вот визуальный телескоп не создает за своей последней линзой действительного изображения. Вместо этого он создает мнимое изображение перед ней.

**Рис. 15.3.1.** (а) Хрусталик глаза принимает идущие от объекта расходящиеся лучи и фокусирует их на сетчатке. (б) Глядя на действительное изображение, вы тоже видите свет, расходящийся от некоторой области пространства, и хрусталик фокусирует его на сетчатке.



**Рис. 15.3.2.** (а) Свет от объекта, находящегося очень близко от собирающей линзы, расходится после прохождения через линзу. (б) Ваш глаз видит крупное и далеко расположенное мнимое изображение.

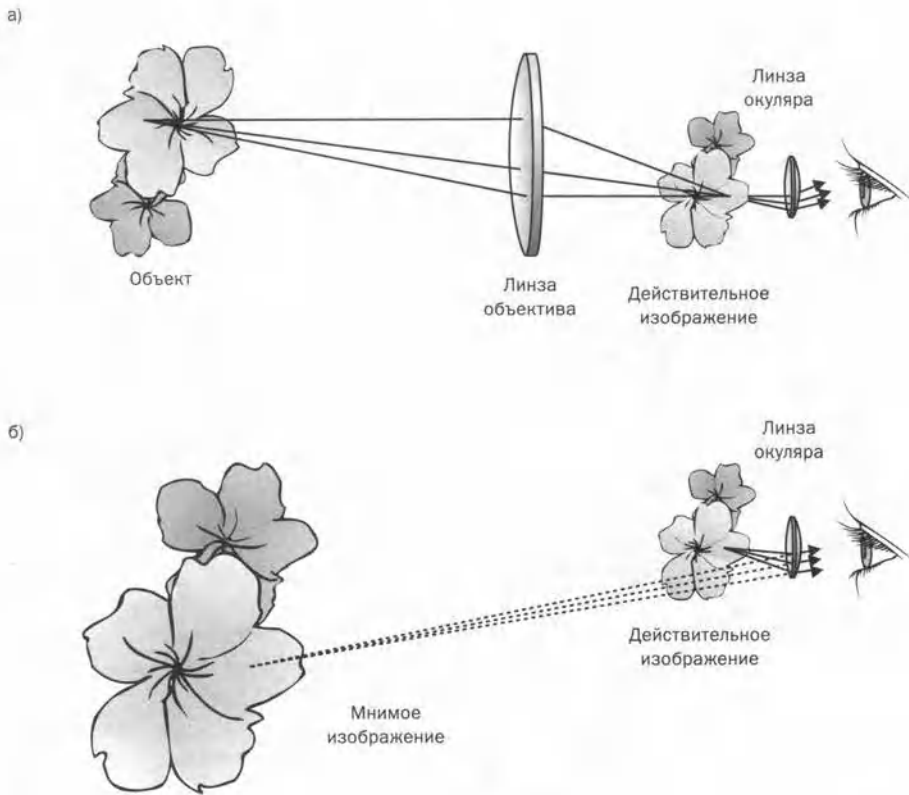


Чтобы понять, как работает визуальный телескоп, представьте фотографический телескоп (или фотоаппарат с телеобъективом, что то же самое), с которого сняли датчик изображения. Когда нет останавливающей его преграды, свет после действительного изображения продолжает идти дальше и формирует поток расходящегося света.

Если вы посмотрите на этот поток света, то увидите плавающее в пространстве действительное изображение (**рис. 15.3.1**). Поскольку свет от действительного изображения расходится так же, как от сплошного объекта, действительное изображение и выглядит как сплошной объект. На самом деле порой трудно сказать, на что мы смотрим: на объект или на его действительное изображение.

Но в визуальном телескопе вы не смотрите непосредственно на действительное изображение; вы смотрите на него через окуляр, точнее, линзу окуляра — то есть, в сущности, через очень сильное увеличительное стекло. Как и окуляр в видоискателе фотоаппарата, этот окуляр основан на собирающей линзе, которая расположена так близко к объекту, на который вы смотрите, что действительное изображение не формируется за линзой (**рис. 15.3.2, а**). Расстояние до объекта меньше фокусного расстояния окуляра, поэтому расстояние между линзой и изображением является отрицательным и мнимое изображение образуется перед окуляром (**рис. 15.3.2, б**). Это означает, что лучи от объекта продолжают расходиться после прохождения через окуляр, и создается впечатление, что они исходят от увеличенного мнимого изображения, находящегося дальше, чем сам объект. Вы не можете потрогать это мнимое изображение, но хорошо видите его.

В визуальном телескопе объект, на который вы смотрите через окуляр, на самом деле является действительным изображением, создаваемым первой частью телескопа. При помощи окуляра вы можете увеличить действительное изображение и более четко разглядеть детали. Вы можете сфокусировать окуляр, как любое увеличительное стекло, перемещая его взад-вперед. Чем дальше окуляр от действительного изображения, на которое вы смотрите, тем в меньшей степени расходятся световые лучи после прохождения через линзу, и тем более удаленным становится мнимое изображение. Когда расстояние до объекта в точности равно фокусному расстоянию линзы окуляра, мнимое изображение кажется бесконечно удаленным. В этом случае вы можете рассматривать увеличенное изображение расслабленным глазом, как будто смотрите на что-то очень далекое.



**Рис. 15.3.3.** (а) Телескоп Кеплера состоит из двух собирающих линз. Линза объектива формирует действительное изображение удаленного объекта. Окуляр действует как увеличительное стекло, давая вам возможность рассмотреть действительное изображение в мельчайших подробностях. (б) Когда вы смотрите через окуляр, то видите очень большое, далекое и перевернутое мнимое изображение объекта.

Когда вы смотрите на объект через окуляр, объект увеличивается потому, что занимает основную часть вашего поля зрения. Степень увеличения растет по мере уменьшения фокусного расстояния линзы окуляра. Объясняется это тем, что окуляр с более коротким фокусным расстоянием должен находиться довольно близко к объекту: тогда он может так изменить направление световых лучей, исходящих от небольшой области, чтобы они заполнили все ваше поле зрения. Окуляр же с большим фокусным расстоянием должен располагаться дальше от объекта, чтобы он мог перенаправить лучи, исходящие от большой области, и дать вам возможность увидеть более широкую картину, но с меньшим увеличением\*.

## Отражательные телескопы

Обычный визуальный телескоп используют две собирающие линзы: одна формирует действительное изображение отдаленного объекта, другая его увеличивает, чтобы наблюдатель мог разглядеть отдельные детали (рис. 15.3.3). Первая линза называется объективом, вторая — окуляром. Поскольку этот телескоп, чтобы собрать свет от удаленного объекта, использует преломление в объективе, его называют рефракционным или преломляющим телескопом, или просто рефрактором. Точнее, такой телескоп называют телескопом Кеплера, в честь немецкого астронома Иоганна Кеплера (1571–1630). А вот другой вариант, в котором используется одна собирающая линза и одна рассеивающая, отклоняющая лучи в разные стороны, называется телескопом Галилея в честь итальянского ученого Галилео Галилея (1564–1642).

Поскольку объектив кеплеровского телескопа создает перевернутое действительное изображение, изображение, которое вы видите через окуляр, тоже перевернуто. Это не имеет особого значения, когда речь идет об астрономии, но превращается в проблему при наземном использовании прибора. Трудно наблюдать, скажем, за птицами, когда видишь их перевернутыми вверх ногами и справа-налево. Вот почему бинокли, в основе своей являющиеся кеплеровскими телескопами, имеют оборачивающую систему, которая делает окончательное изображение неперевернутым. Оборачивающая система изменяет оптические пути бинокля и придает ему характерную форму.

\* Увеличение телескопа равно отношению фокусных расстояний объектива и окуляра, поэтому уменьшение фокусного расстояния окуляра повышает увеличение. Но при этом может уменьшиться угол поля зрения, показываемый, насколько сильно могут отклоняться от оси телескопа звезды, которые попадают в поле зрения.

Когда вы смотрите на объект через визуальный телескоп, то видите увеличенное мнимое изображение. Степень увеличения телескопа Кеплера зависит от фокусного расстояния двух линз. По мере того как фокусное расстояние объектива увеличивается, его действительное изображение становится все больше, и соответственно растет степень увеличения телескопа. Чем меньше фокусное расстояние окуляра, тем ближе вы видите действительное изображение и тем больше степень увеличения. В итоге степень увеличения телескопа Кеплера равна фокусному расстоянию объектива, деленному на фокусное расстояние окуляра.

Однако, как мы уже говорили в разделе о фотоаппаратах, простые линзы создают недостаточно качественные изображения. Большинство объективов и окуляров телескопов на самом деле состоят из нескольких оптических элементов. Чтобы избежать хроматической аберрации (проблемы фокусировки цветов), эти линзы выполняют из ахроматических дублетов, пар подобранных друг к другу оптических элементов, которые соединены прозрачным связующим. Два элемента дублета изготавливаются из различных видов стекла, так что их дисперсии нейтрализуют друг друга, и они выступают как одна линза, у которой почти нет хроматической аберрации.

Но даже ахроматические дублеты не способны создать идеальное изображение. Вот почему окуляры телескопов часто содержат четыре, пять или даже шесть отдельных оптических элементов. Эти прецизионные окуляры создают очень четкие по всей площади изображения. Как и в объективе фотоаппарата, отдельные элементы имеют антибликовое покрытие, чтобы вы не видели никаких отражений, когда смотрите в телескоп.

Окуляры телескопов бывают простые и сложные, дешевые и дорогие. Окуляр обычно имеет черную апертуру, которая не дает вам видеть искаженные части изображения вне четкого центрального круга. Как правило, чем сложнее и дороже окуляр, тем шире его доступное поле зрения и тем больше центральный круг. Самые совершенные и дорогие окуляры дают такую широкую и четкую картинку действительного изображения телескопа, что вам кажется, будто вы смотрите прямо на сцену перед вами, — вы практически не замечаете ограничения поля зрения. Наблюдаете ли вы за звездами или любуетесь пейзажем, разница между тем, что вы видите через маленькое отверстие обычного недорогого телескопа и той широкой панорамой, которую открывает перед вами сложный дорогой прибор, просто поразительна. Один взгляд через хороший окуляр хорошего телескопа — и у вас захватывает дух.

## Телескопы-рефлекторы

Однако не во всех телескопах в объективах имеются линзы. Отражающий телескоп, или телескоп-рефлектор, для создания исходного действительного изображения использует зеркало. По причинам, которые мы вскоре обсудим, в астрономии отражающие телескопы практически полностью вытеснили телескопы-рефракторы.

Плоское зеркало само по себе интересный оптический прибор. Оно формирует мнимое изображение любого объекта (рис. 15.3.4). Исходящий от объекта расходящийся свет отражается от зеркала и продолжает расходиться, пока не достигает наших глаз. Этот свет идет от мнимого изображения, расположенного по другую сторону зеркала точно на таком же расстоянии от него, как и сам объект. Мнимое изображение перевернуто справа налево, так что вы видите “зеркальное отражение”. Когда вы смотрите на зеркальное отражение, кажется, будто оно такого же размера, как сам объект.

Если зеркало сферическое, а не плоское, оно все равно создает мнимые изображения. Но эти изображения уже не находятся точно напротив исходных объектов и не кажутся равными им по размерам. Зеркало с изгибом внутрь, как

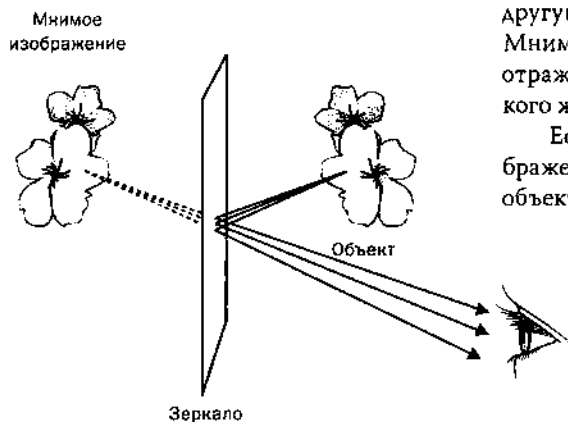
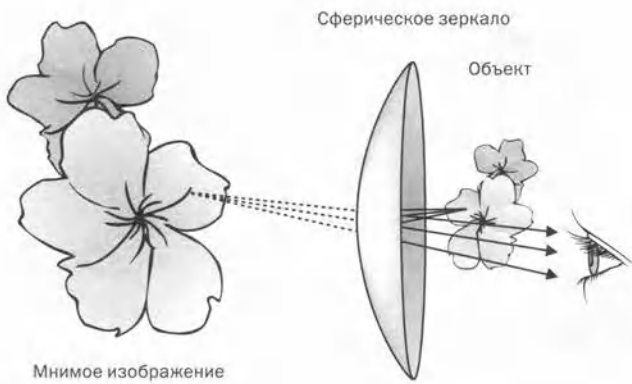


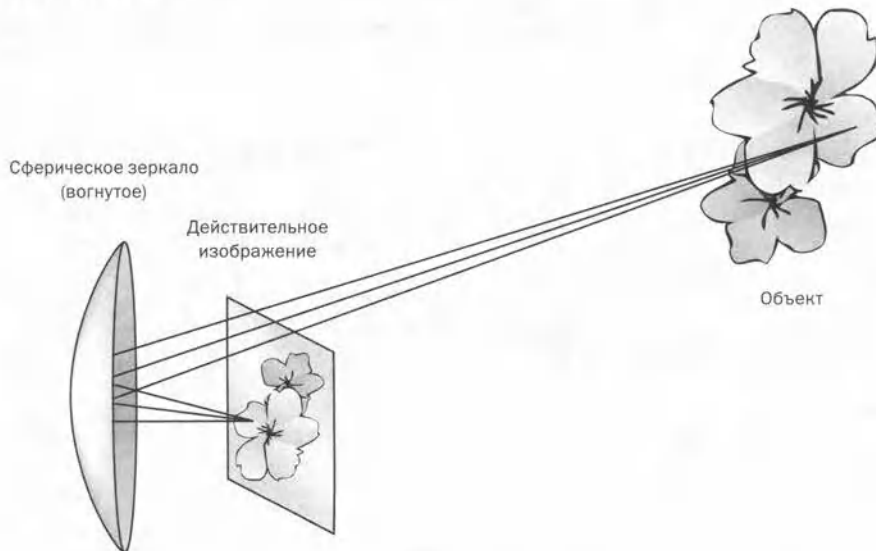
Рис. 15.3.4. Плоское зеркало создает мнимое изображение любого помещенного перед ним объекта. Мнимое изображение находится точно напротив исходного объекта, но оно перевернуто справа налево (или, точнее, задом наперед).



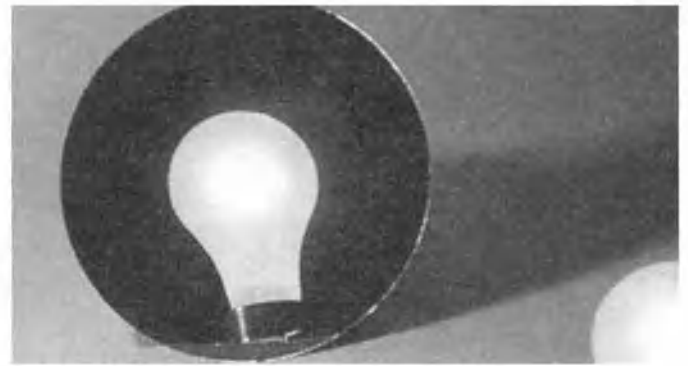
**Рис. 15.3.5.** Вогнутое зеркало образует мнимое изображение любого находящегося вблизи него объекта. По сравнению с исходным объектом мнимое изображение увеличено в размерах и кажется расположенным дальше от зеркала, чем сам объект. Как и плоское зеркало, вогнутое переворачивает мнимое изображение в другую сторону (задом наперед).

у чаши, называется вогнутым. Когда объект находится вблизи вогнутого зеркала, расходящиеся от него лучи отражаются от зеркала и продолжают расходиться, но не так быстро (рис. 15.3.5). Они исходят от крупного мнимого изображения, которое находится далеко за зеркалом (рис. 15.3.6). Этим объясняется, почему в зеркале для макияжа вы видите свое лицо увеличенным. Пока ваше лицо недалеко от вогнутого зеркала, вы видите свое увеличенное мнимое изображение, расположенное далеко за зеркалом. (В противоположность этому, зеркало с изгибом наружу, выпуклое зеркало, создает уменьшенное виртуальное изображение, расположенное сразу за зеркалом.)

Однако когда объект находится далеко от вогнутого зеркала, расходящиеся от объекта лучи отражаются от зеркала и сходятся с образованием действительного изображения (рис. 15.3.7 и 15.3.8). Это действительное изображение точно такое же, как создаваемое линзой, только оно находится перед зеркалом. Вы можете спроецировать это действительное изображение на лист бумаги или на датчик изображения. Именно так работает фотографический телескоп-рефлектор. Как обычно, действительное изображение перевернуто вверх ногами и справа налево. (О другом использовании вогнутых зеркал и их действительных изображений см. ❸.)



**Рис. 15.3.7.** Когда объект находится далеко от вогнутого зеркала, оно создает действительное изображение объекта. В телескопе-рефлекторе фотопленка или другая светочувствительная поверхность обычно размещается в месте формирования действительного изображения.

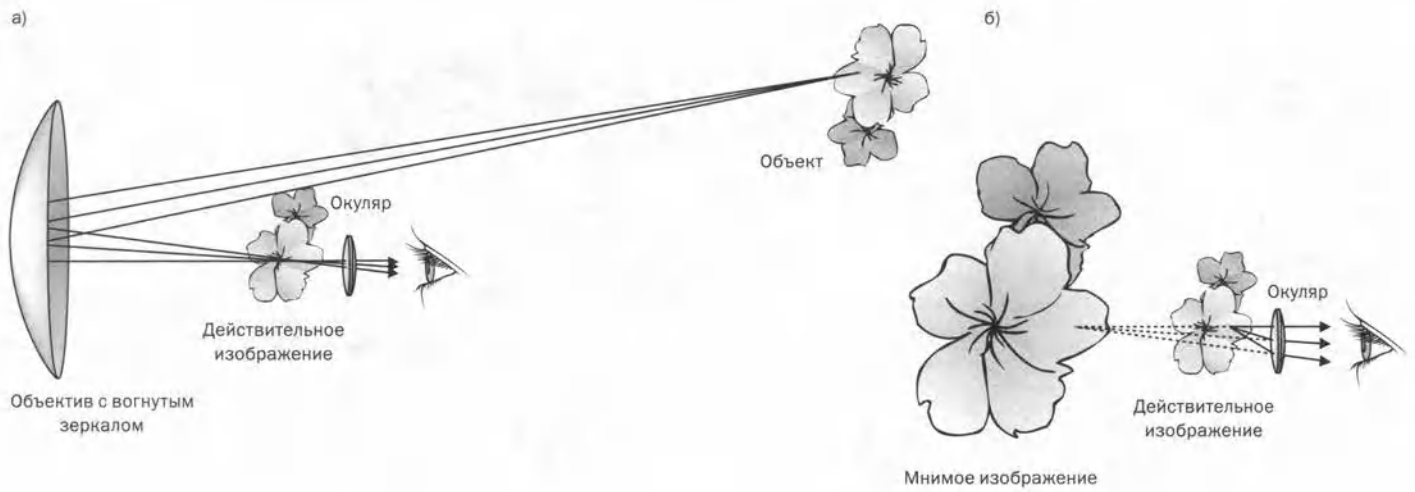


**Рис. 15.3.6.** Сферическое вогнутое зеркало создает прямое мнимое изображение расположенной прямо перед ним лампочки.

❶ Солнечные коллекторы — это всего лишь направленные на Солнце зеркальные телескопы. Солнечный свет приходит с огромного расстояния, поэтому его лучи практически параллельны и параболические зеркала могут его аккуратно сфокусировать. В фокусе зеркала образуется круглое действительное изображение Солнца, которое может готовить еду, кипятить воду или обрабатывать вещества и материалы.



**Рис. 15.3.8.** Сферическое вогнутое зеркало создает перевернутое действительное изображение находящейся далеко от него лампочки.



**Рис. 15.3.9.** (а) Визуальный телескоп-рефлектор состоит из объектива с вогнутым зеркалом и окуляра с собирающей линзой. Вогнутое зеркало формирует действительное изображение удаленного объекта, в то время как окуляр позволяет исследовать это изображение в деталях. (б) Когда вы смотрите через окуляр, то видите увеличенное и перевернутое мнимое изображение удаленного объекта.

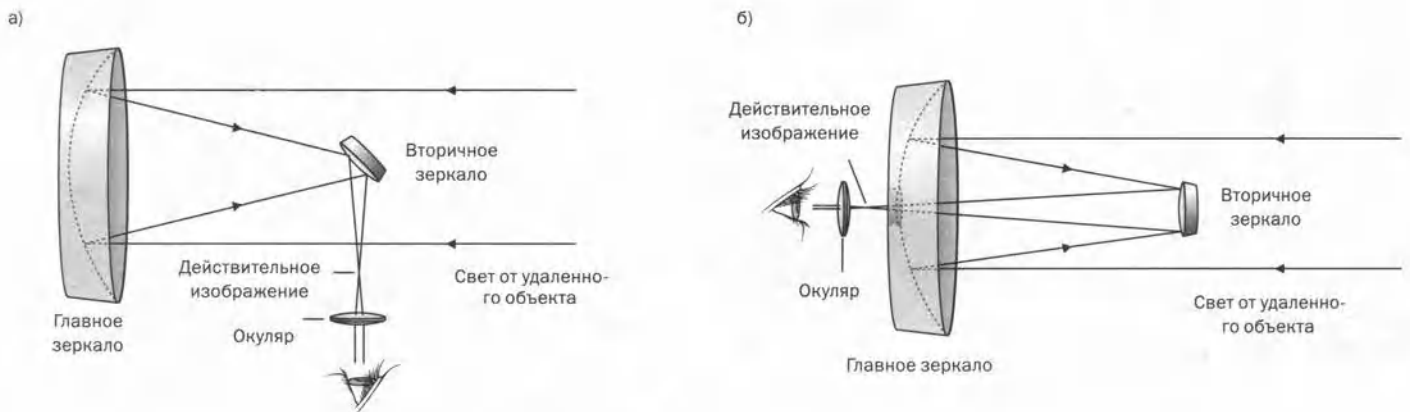
Визуальный телескоп-рефлектор просто добавляет к этому окуляр, при помощи которого вы можете в подробностях исследовать действительное изображение (рис. 15.3.9). Через окуляр вы видите увеличенное изображение исходного объекта.

Чтобы создать действительное изображение нужной резкости, зеркало телескопа-рефлектора (как и линза объектива телескопа-рефрактора) должно иметь строго определенную форму. Так как этот телескоп использует отражение, а не преломление, он хорошо справляется с цветами и в нем не возникает хроматических aberrаций. Но единственное зеркало дает различные дефекты изображения, обычно незначительные вблизи центра действительного изображения, но тем более серьезные, чем ближе к краям. Зеркала, используемые для наблюдения астрономических объектов, как правило, имеют параболическую форму. Создаваемые ими действительные изображения почти идеальны в центральной части, но недостаточно качественны по периметру. Такие телескопы обычно показывают только центральные, четкие и ясные части действительных изображений.

В визуальном телескопе-рефлекторе, изображенном на рис. 15.3.9, голова наблюдателя находится перед вогнутым зеркалом. В случае некоторых больших телескопов наблюдатель сидит перед зеркалом, изучая действительное изображение, однако большинство малых телескопов пытаются убраться наблюдателя с оптического пути зеркала. Они перенаправляют свет от зеркала объектива так, чтобы вы не оказывались перед ним. Два наиболее распространенных способа достичь этого — телескопы-рефлекторы Ньютона (рис. 15.3.10, а) и Кассегрена (рис. 15.3.10, б).

В телескопе Ньютона плоское вторичное зеркало отклоняет свет от вогнутого зеркала объектива на  $90^\circ$ , так что действительное изображение формируется в стороне от телескопа. Вы можете наблюдать это изображение через окуляр, не блокируя свет на пути к главному зеркалу.

В телескопе Кассегрена выпуклое вторичное зеркало через отверстие в центре главного зеркала отражает назад свет от вогнутого зеркала объектива. По-





сколькx вторичное зеркало слегка отклоняет лучи наружу, сходжение света задерживается, так что действительное изображение образуется позади телескопа. Вы наблюдаете его через расположенный за телескопом окуляр.

В обоих телескопах, и Ньютона, и Кассегрена, небольшое зеркало в центре поля зрения прибора должно на чем-то держаться. Эти жесткие опорные конструкции, или "пауки", часто появляются на фотографиях звезд из-за дифракционных эффектов и придают звездам неестественный крестообразный ореол.

## Апертура телескопа

Диаметр объектива или главного зеркала телескопа определяет две его важные характеристики: способность собирать свет и разрешающую способность, то есть умение отличать друг от друга расположенные рядом объекты. С собиpанием света все более или менее просто — чем больше света телескоп может собрать и сфокусировать в действительном или мнимом изображении, тем ярче будет это изображение. Объекты в ночном небе достаточно тусклые, к тому же телескоп распределяет собранный свет на изображениях большой площади, поэтому он должен собирать как можно больше света. Сильное увеличение бесполезно, если вы видите только увеличенную темноту.

Другая причина появления огромных зеркал — разрешающая способность. Свет распространяется в виде волны. Пройдя через узкое отверстие, волна расходится — испытывает дифракцию. Когда световые волны, приходящие от далекой звезды, проходят через линзу или зеркало телескопа, они подвергаются дифракции и начинают слегка расходиться. Чем больше линза или зеркало, тем меньше дифракция и расходжение. Может показаться, что этим незначительным расходжением можно пренебречь. В конце концов, фотографии пейзажей или зданий, которые вы снимаете, получаются очень четкими и яркими, даже когда вы используете небольшой объектив. Но что, если вы на расстоянии километра попытаетесь сосчитать у человека ресницы? А это приблизительно то, что делают некоторые телескопы.

Когда свет от двух соседних звезд проходит через телескоп, он подвергается дифракции. Расходящиеся волны света от одной звезды могут перекрываться волнами от другой. В этом случае две звезды сольются. Они появятся на датчике изображения или в мнимом изображении в виде одного яркого пятна. Чтобы добиться разрешения двух звезд, то есть отличить их друг от друга, вам понадобится линза или зеркало достаточно большие, чтобы световые волны от звезд не накладывались друг на друга. Необходимый в современной астрономии уровень разрешения требует, чтобы диаметр телескопов достигал нескольких метров.

К сожалению, линзы диаметром больше 0,5 м чрезвычайно трудно изготовить, потому что стекло становится настолько толстым и тяжелым, что деформируется под собственным весом. Кроме того, при охлаждении расплавленной стеклянной массы возникают давление и напряжение, которые ухудшают оптические свойства стекла. Более того, чтобы сделать ахроматический дублет, нужно два отдельных элемента. В мире есть несколько телескопов-рефракторов с линзами диаметром более 0,5 м, и каждая из них — уникальный шедевр, величайшее достижение изготовившего ее мастера.

Поскольку линзы большего диаметра получить невозможно, астрономы обратились к зеркалам, чтобы с их помощью фотографировать и наблюдать далекие туманные объекты нашей Вселенной. Зеркала проще изготовить, чем линзы, хотя создание зеркала размером больше 3 м в диаметре до сих пор требует героических усилий. Поскольку зеркала не должны быть прозрачными, их внутренние структуры можно оптимизировать по прочности и устойчивости. Зеркала часто делают из полупрозрачной стеклокерамики, которая выдерживает температурные перепады гораздо лучше стекла. В последние годы появились композитные зеркала, в которых зеркальные сегменты проектируются, изготавливаются и устанавливаются при помощи программного управления и лазерных лучей. Эти гигантские сегментные зеркала могут собирать свет с огромных участков.

К несчастью, атмосфера Земли ограничивает разрешение больших зеркальных телескопов. Когда свет от звезды проходит через атмосферу, колебания плотности воздуха искажают волну так, что она не может быть сведена к одной точке на действительном или мнимом изображении. Самый простой способ до-

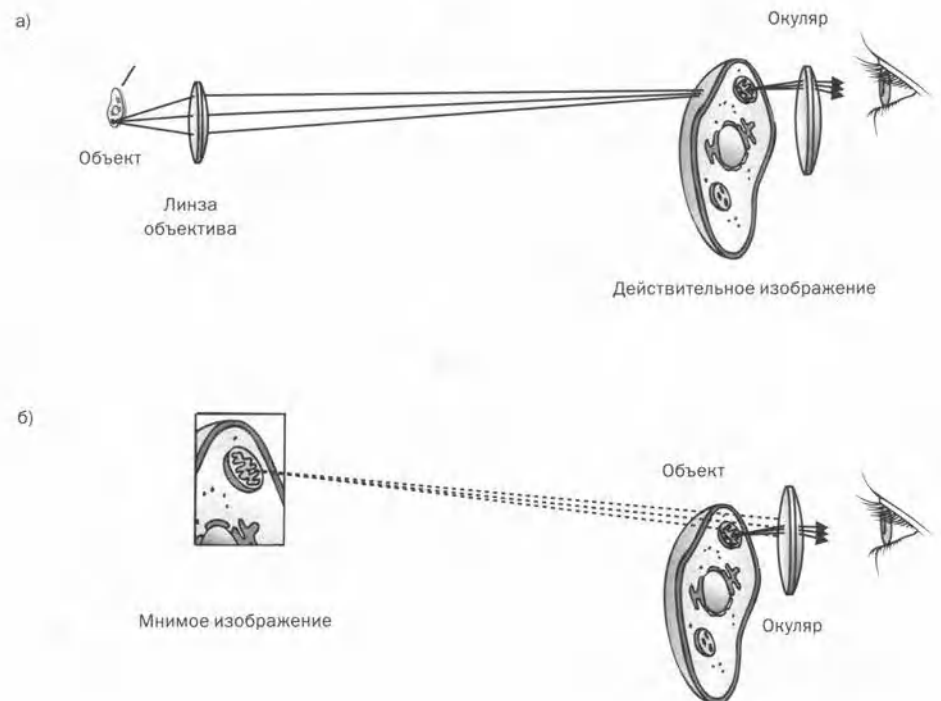
биться максимально возможной разрешающей способности гигантского зеркала — убрать его из атмосферы и перенести на околоземную орбиту. Космический телескоп “Хаббл” блестяще справляется с этой задачей.

Тем не менее методы адаптивной оптики позволили и наземным телескопам достичь поразительно высокого разрешения. Такие телескопы при помощи компьютерных средств управления изменяют форму гибких зеркал и таким образом почти полностью компенсируют атмосферные искажения. Адаптивные телескопы много раз в секунду измеряют, как атмосфера искажает свет от реальной звезды или ее лазерной модели, и на основании этой информации корректируют форму зеркала так, чтобы свести атмосферные искажения к минимуму. Несмотря на то что воздух все равно поглощает свет определенных длин волн и создает фоновое свечение из-за рэлеевского рассеяния, сегодня наземные телескопы с адаптивной оптикой по разрешающей способности вполне могут конкурировать с космическими телескопами.

## Микроскопы

Оптические микроскопы — это почти то же самое, что телескопы Кеплера, за исключением фокусных расстояний линз и расположения объектов наблюдения. Телескоп Кеплера использует длиннофокусные линзы объектива для проецирования больших действительных изображений удаленного объекта, в то время как микроскоп при помощи короткофокусных линз объектива проецирует большое действительное изображение близкого объекта (**рис. 15.3.11**). Окуляры телескопов и микроскопов практически идентичны, в обоих случаях они выполняют роль высококачественных увеличительных стекол, через которые наблюдатель изучает действительные изображения.

Хотя микроскоп технически устроен так же, как телескоп, их конструкции имеют разные ограничения. В то время как объектив телескопа должен быть как можно больших размеров, объектив микроскопа должен быть очень маленьким. Объектив микроскопа должен придвигаться близко к объекту, ловить быстро расходящиеся от него световые лучи и собирать их в виде действительного изображения далеко от линзы объектива. Поскольку фокусное расстояние объектива должно быть еще меньше, чем расстояние до объекта, объектив должен состоять из маленьких оптических элементов с высокой степенью кривизны. Для построения высококачественного действительного изображения, которое оставалось бы



**Рис. 15.3.11.** (а) Визуальный микроскоп состоит из двух собирающих линз. Линза объектива формирует действительное изображение маленького, находящегося близко объекта. Окуляр действует как увеличительное стекло, что позволяет рассмотреть действительное изображение в мельчайших подробностях. (б) Глядя в окуляр, вы видите сильно увеличенное, удаленное и перевернутое мнимое изображение объекта.

резким и четким, когда вы будете рассматривать его через увеличительное стекло, необходимо несколько элементов.

Степень увеличения микроскопа трудно точно подсчитать в основном потому, что она зависит от того, что вы выбираете в качестве неувеличенного изображения, — объект, расположенный близко к глазу, выглядит крупнее, чем объект, находящийся на расстоянии. Тем не менее при сокращении фокусного расстояния объектива микроскоп всегда будет увеличивать сильнее, потому что в этом случае объектив окажется ближе к объекту и будет формировать действительное изображение меньшего участка поверхности объекта. Уменьшение фокусного расстояния окуляра также способствует большему увеличению, потому что позволяет вам рассматривать действительное изображение с более близкого расстояния.

Для микроскопа очень важно освещение. В телескопе приходится использовать доступный естественный свет, а в микроскопе можно добавлять любую подсветку. В большинстве микроскопов свет яркой лампочки направляется либо вверх через объект, либо вниз на объект. То, что вы видите в этих двух случаях, принципиально отличается. Если вы просвечиваете объект снизу, то видите, сколько света поглощается его разными частями. Если вы направяете свет на его поверхность, то видите, сколько света отражается от различных частей объекта.

Многие современные микроскопы имеют два отдельных окуляра, чтобы можно было использовать оба глаза. В этих микроскопах только одна линза объектива, но свет от этой линзы делится на два потока частично отражающим зеркалом. Формируется два идентичных действительных изображения, и каждый окуляр увеличивает свое. Более того, существуют микроскопы, в которых часть света дополнительно отделяется для других наблюдателей или для фотографирования. В последнем случае часть света от объектива отводится в сторону и формирует действительное изображение непосредственно на датчике изображения.

## Неоптические телескопы и микроскопы

Мы наблюдаем объекты во Вселенной почти исключительно за счет испускаемого ими электромагнитного излучения. Электромагнитные волны с легкостью путешествуют в пустоте и могут пересекать невероятные расстояния между галактиками. Но свет — далеко не единственный вид электромагнитных волн. Земля также подвергается воздействию радиоволн, микроволн, рентгеновского и гамма-излучения от источников из самых разных уголков Вселенной.

Для изучения этих электромагнитных волн астрономы обычно используют отражающие телескопы. Однако по своим характеристикам эти телескопы несколько отличаются от ранее рассмотренных нами оптических телескопов. Радиотелескоп формирует действительное изображение электромагнитных волн от удаленного объекта при помощи огромной вогнутой металлической “тарелки”. В большинстве случаев эти волны относятся к разряду микроволн. Вместо того чтобы использовать для изучения действительного изображения оптический датчик изображения или увеличительное стекло, радиотелескоп использует небольшой СВЧ-приемник. Телескоп точка за точкой сканирует действительное изображение, либо перемещая СВЧ-приемник вокруг изображения, либо направляя “тарелку” и приемник на разные области пространства.

Поскольку у более длинных радиоволн по сравнению с более короткими световыми волнами сильнее выражены дифракционные эффекты, для получения детальных изображений неба радиотелескопы должны применять зеркала большого диаметра. К счастью, длинные волны также позволяют использовать в радиотелескопах зеркала из металлической сетки, а не из сплошного металла. Причина в том, что электромагнитные волны практически нечувствительны к отверстиям, размер которых значительно меньше длины самих волн.

Бытовая спутниковая антенна, которую мы называем “тарелкой”, по сути представляет собой небольшой радиотелескоп. Она создает действительное изображение падающих на нее микроволн и сканирует его центральную часть при помощи СВЧ-приемника. Когда антенна направлена на спутник, волны от спутника фокусируются точно на антенне приемника. И, как и ее более крупные родственники, для отражения микроволн спутниковая антенна может использовать металлическую сетку.

То, что электромагнитные волны почти не зависят от структур, размер которых меньше длины этих волн, работает против оптических микроскопов. Поскольку через оптический микроскоп невозможно рассмотреть детали размером меньше длины волны видимого света, чтобы увидеть структуры меньшего размера (1 мкм и ниже), нужен микроскоп другого типа.

Два важных вида неоптических микроскопов — электронные микроскопы и сканирующие зондовые микроскопы. Электронные микроскопы для формирования изображения мелких объектов используют электроны. Сканирующие зондовые микроскопы точка за точкой зондируют структуры поверхностей чрезвычайно острыми иглами.

Электроны в электронном микроскопе распространяются в виде волны, и, как и для видимого света, их разрешающая способность ограничивается длиной волны. Однако длина волны электрона уменьшается по мере возрастания его кинетической энергии, поэтому в электронных микроскопах используются электроны с высокой энергией, длина волны которых намного меньше диаметра атомов. Разрешающая способность некоторых электронных микроскопов позволяет различить отдельные атомы.

Как и оптические, электронные микроскопы формируют изображения, используя линзы, только вместо световых лучей работают электронные. Но электронные линзы — это не просто куски стекла. Они представляют собой электромагнитные устройства, которые при помощи электрических и магнитных полей отклоняют и фокусируют движущиеся электроны. В просвечивающем электронном микроскопе электроны проходят через объект, через несколько разных электромагнитных линз и, наконец, образуют действительное изображение на люминесцентном экране или датчике изображения. Фокусные расстояния линз подобраны так, что действительное изображение в тысячи или даже в миллионы раз больше, чем сам объект.

Сканирующий электронный микроскоп при помощи электромагнитной линзы фокусирует электронный пучок в крошечном пятне на объекте, а затем отслеживает отраженные электроны. Микроскоп вдоль и поперек сканирует пятно на поверхности объекта и постепенно создает ее изображение.

Сканирующий электронный микроскоп может также обнаружить характеристическое рентгеновское излучение, которое испускают атомы под воздействием электронного пучка микроскопа. Как я объясню в следующей главе, атомы в высокоэнергетическом состоянии часто испускают рентгеновские лучи. Поскольку атомы каждого элемента излучают свой собственный уникальный спектр характеристического рентгеновского излучения, микроскоп может с невероятной точностью находить и идентифицировать элементы на поверхности. Изучая мельчайший участок поверхности, ученый может не только разглядеть ее пространственную структуру, но и определить элементы, присутствующие в любой точке этой поверхности.

Зондовые микроскопы появились в начале 1980-х годов с созданием сканирующего туннельного микроскопа. Идея таких микроскопов проста: острый зонд проходит по поверхности во всех направлениях, и по результатам взаимодействия с поверхностью делают выводы об ее структуре и свойствах. Но мало кто предполагал, что зонд можно сделать настолько острым, чтобы он взаимодействовал с отдельными атомами поверхности.

Поэтому научное сообщество немало удивилось, когда немецкий физик Герд Бинниг (р. 1947) и его швейцарский коллега Генрих Рорер (р. 1933) обнаружили, что металлические зонды могут обмениваться электрическими токами с отдельными атомами. Сканируя поверхность, зонды могут обозначить расположение атомов и получить изображение поверхности на атомном уровне. За изобретение сканирующего туннельного микроскопа эти ученые в 1986 году получили Нобелевскую премию по физике. С тех пор было разработано много разнообразных сканирующих зондовых микроскопов.

Во всех этих устройствах сверхострый зонд или наконечник сканирует поверхность, при движении взаимодействуя с несколькими поверхностными атомами. Компьютер измеряет характеристики этих взаимодействий и строит карту поверхности. Взаимодействия включают в себя обмен электронами, электрические и магнитные силы и даже трение.

## ГЛАВА 16

# ДОСТИЖЕНИЯ СОВРЕМЕННОЙ ФИЗИКИ

**В** последние годы ученые заглядывают все глубже внутрь атома — чтобы узнать, как он устроен; все дальше в космос — чтобы понять, как работает Вселенная; все внимательнее присматриваются к материи и движению, чтобы научиться объяснять сложные вещи при помощи простых законов. Лучшее всего им в этом помогают квантовая физика и теория относительности. В этой главе мы подробнее рассмотрим, как современная физика влияет на нашу жизнь.

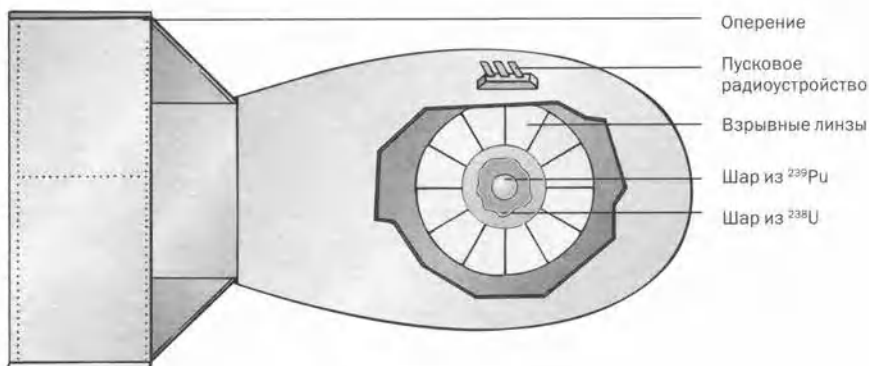
Применение достижений современной физики в нашей жизни вызывает смешанные чувства. С одной стороны, физика подарила нам поистине изумительные инструменты для изучения человеческого организма, лечения болезней и улучшения здоровья. Но появлением самого страшного оружия, которое только можно представить, мы тоже обязаны физике... Если в этой главе я буду описывать эти две стороны современной физики, не комментируя на каждом шагу положительный и отрицательный аспекты, это не потому, что мне все равно, — просто если мне придется отвлекаться на моральную оценку, качество объяснений пострадает. Поэтому я позволю себе один раз кратко высказаться по этому вопросу, а затем мы перейдем к делу.

У меня много разнообразных опасений, связанных с наукой и техникой: мы движемся одновременно в самых разных направлениях, не задумываясь о последствиях. Одни пути ведут нас к лучшей жизни и прекрасному будущему. Другие — к бедам и раздорам, к разрушению человеческих отношений, сообществ, целых народов, всего нашего жизненного уклада. Насколько лучше был бы мир, если бы в самом начале было ясно, куда приведет дорога, если бы можно было видеть на несколько шагов вперед! Чаще всего мы осознаем, какую цену придется заплатить за неудачный выбор, только после того, как его сделали.

Однако игнорировать саму науку еще опаснее, чем игнорировать ее нравственные и социальные последствия. Мы живем в тревожное время: наукой то и дело пренебрегают, а то и вовсе отменяют ее доводы, как чье-то досужее мнение; псевдоученые не стесняются подделывать данные, чтобы доказать свои безумные доктрины, если научно обоснованные теории, базирующиеся на фактических данных, оказываются для них неудобны.

Для меня одна из главных ценностей физики состоит в ее реальности и истинности, в том, что она дает правдивые ответы, которые вновь и вновь подтверждаются измерениями и экспериментами. Как бы им этого ни хотелось, невежды не могут просто так отмахнуться от этих истин, не отвергая при этом саму реальность. К счастью, мировоззрение, основанное на науке, точно так же признает искусство, историю, теологию и прочие гуманитарные дисциплины. Наш мир прекрасен и многогранен с любой точки зрения.

- 550 **16.1 Ядерное оружие**  
*Как ядерное оружие высвобождает огромную разрушительную энергию.*
- 564 **16.2 Ядерные реакторы**  
*Как ядерные реакторы укрощают и контролируют ядерную энергию.*
- 573 **16.3 Медицинская диагностика и радиация**  
*Как медицина при помощи физики заглядывает внутрь человека и лечит его от болезней.*



## 16.1 Ядерное оружие

Атомная бомба — одно из самых замечательных и печально знаменитых изобретений двадцатого столетия. Она появилась очень скоро после того, как произошел научный прорыв в понимании природы атомного ядра — событие, которое во многом сделало неизбежным изобретение ядерного оружия. К концу 1930-х годов ученые уже открыли большинство принципов ядерной энергии и хорошо понимали, как их можно применить. Начало Второй мировой войны усилило опасения, что Германия выберет военный путь развития ядерной энергии. Движимые страхом и любопытством, ученые, инженеры и политики того времени произвели на свет ядерное оружие. И с тех пор мир живет в тени этого устрашающего изобретения.

### Предыстория

В конце XIX века в науке царила так называемая “классическая физика”. Под этим термином мы подразумеваем законы движения и гравитации, открытые такими гениями, как Галилей, Ньютон и Кеплер, а также законы электричества и магнетизма, над которыми работали Ампер, Кулон, Фарадей и Максвелл. Общее мнение склонялось к тому, что большая часть физики уже известна: ученые знают все законы, регулирующие поведение объектов в нашей Вселенной, и теперь нужно применять эти законы ко все более сложным случаям. Это было время, когда физики еще не знали, чего они не знают.

Тем не менее оставалось несколько неразрешенных вопросов, на которые нельзя было ответить в рамках классической физики. Среди них были спектр излучения абсолютно черного тела, явление фотоэффекта, когда свет выбивает электроны из металлов, а также очевидное отсутствие эфира или среды, в которых распространяется свет. В начале двадцатого века вся классическая физика рухнула под тяжестью этих, казалось бы, не очень существенных вопросов, и возникло новое понимание мироздания. Период основных открытий длился четверть века, с 1901 по 1926 год, а после этого ученые уже в большей степени занимались применением этих новых законов ко все более сложным объектам.

Два главных события, сыгравшие немалую роль и в изобретении атомной бомбы, — это появление квантовой физики (или квантовой теории) и теории относительности. Но хотя может показаться, будто слово “теория” подразумевает некую зыбкость, это отнюдь не непроверенные гипотезы. За время своего существования эти теории были доказаны бесчисленное количество раз и продемонстрировали способность с высокой точностью предсказывать будущее. Они являются теориями, скорее, в том смысле, что представляют собой свод тщательно сформулированных и систематизированных законов, по которым существует наша физическая вселенная. В совокупности эти две теории сделали неминуемыми открытие ядерных сил и ядерной энергии. А с учетом человеческой слабости к техническим новинкам и к власти неизбежным оказалось и изобретение ядерного оружия.

## Атомное ядро и радиоактивный распад

Несмотря на то, что более полувека бомбу называли атомной, правильнее было бы называть ее ядерной. За выделение энергии ядерного оружия отвечают не атомы, а составные части атомов — их ядра. Но прежде чем говорить о части, начнем с целого. Поговорим об атомах.

Чтобы получить представление о том, насколько малы атомы, представьте, будто вы увеличиваете кристаллик поваренной соли со стороной 1 мм (0,04 дюйма) до тех пор, пока он не станет размером со штат Колорадо. Тогда этот кристаллик будет выглядеть как упорядоченная структура из сферических частиц, каждая размером с грейпфрут (рис. 16.1.1). Сферические частицы — это одиночные атомы, и вдоль каждого ребра кристалла их должно было бы быть около 7,2 миллиона.

Как большинство твердых веществ, поваренная соль представляет собой кристалл, в котором атомы связаны друг с другом своими внешними компонентами: электронами. Электроны определяют химию атомов и молекул. Электроны делают натрий химически активным металлом, а хлор — химически активным газом. При смешивании эти два химических вещества вступают в бурную реакцию с образованием поваренной соли и выделением значительного количества света и тепла. Чем не “атомная бомба”?

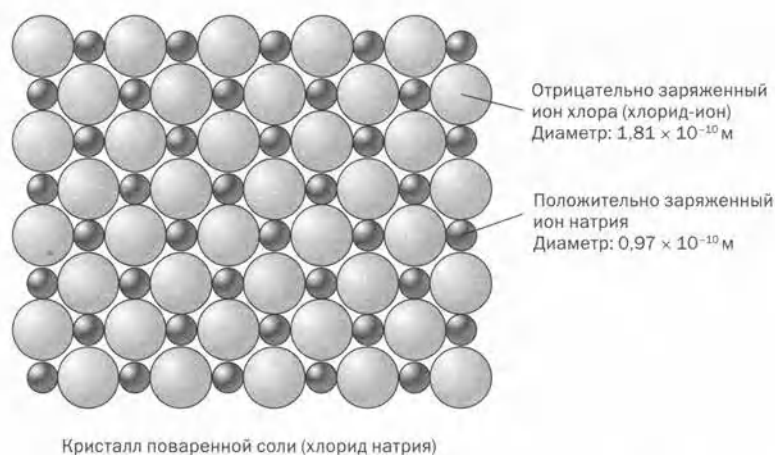
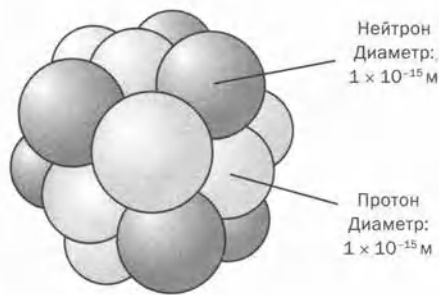


Рис. 16.1.1. Кристалл соли представляет собой упорядоченную структуру из положительно заряженных ионов натрия и отрицательно заряженных хлорид-ионов. Ионы удерживаются вместе силами притяжения между противоположными зарядами. Размеры ионов настолько малы, что на ребре кристалла соли длиной 1 мм помещается примерно 7,2 миллиона ионов.

Очевидно, чего-то здесь не хватает. Если бы любой сумасшедший мог купить килограмм или два натрия и канистру хлора и уничтожить целый город, жизнь в деревне была бы гораздо популярнее. К счастью, энергия, выделяющаяся в результате химических реакций, не так уж велика. Килограмм химических взрывчатых веществ просто не может нанести такой большой ущерб. А вот ядерные бомбы таят глубоко внутри атомов несопоставимый по масштабу запас энергии.

Все, что касается ядерного оружия, обычно связывают с известным уравнением Эйнштейна  $E = mc^2$ , но это очень упрощенный подход. Тем не менее это уравнение достаточно важно. Как мы уже отмечали в разделе 4.2, одно из открытий Эйнштейна в начале XX века состояло в том, что материя и энергия в известной степени эквивалентны. При определенных обстоятельствах масса может стать энергией, а энергия — превратиться в массу. Идея эквивалентности является частью теории относительности и имеет некоторые интересные последствия. Это означает, что тело может снизить свою массу, передавая энергию в окружающее пространство. Таким образом, если вы взвешиваете предмет до и после того, как он подвергается некоей внутренней трансформации, то по потере веса можете рассчитать, сколько энергии предмет выделил во время трансформации.

Благодаря эквивалентности можно использовать массу и ее изменения, чтобы найти скрытую в обычном веществе энергию. Этот метод применяется не только в ядерной физике, но и в химии. Когда натрий и хлор реагируют с образованием поваренной соли, их суммарная масса уменьшается очень незначительно. Исчезает некоторое количество химической потенциальной энергии, которая превращается в свет и тепло и удаляется из смеси. Потеря этой энергии уменьшает массу



Ядро атома натрия  
(11 протонов,  
12 нейтронов)

**Рис. 16.1.2.** В центре иона натрия расположено крошечное ядро, на которое приходится 99,975% его массы. Оно состоит из 11 положительно заряженных протонов и 12 незаряженных нейтронов. Протоны отталкивают друг друга на любом расстоянии, но пока протоны и нейтроны соприкасаются, они удерживаются вместе очень мощной силой притяжения — ядерной силой.

смеси натрия и хлора примерно в соотношении 1 часть на 10 миллиардов. Такое микроскопическое изменение массы слишком мало, чтобы обнаружить его даже при помощи современных измерительных приборов. Впрочем, ученые уже работают над методами, которые в скором времени позволят измерять изменения массы, происходящие при образовании или разрыве химических связей.

Электроны, однако, на сегодняшний день — самая легкая частица атома, и у них относительно мало массы, которую можно перевести в энергию. Основная часть массы атома сосредоточена в ядре. При этом ядро невероятно маленькое — каких-то  $10^{-15}$  м в диаметре. Если бы у вас появилась возможность рассмотреть один из ионов натрия нашей гигантской модели кристалла соли, выросший до размеров грейпфрута, в его центре вы бы с трудом разглядели крошечную частицу. Это и есть ядро иона, диаметр которого был бы равен всего 1 мкм (0,00004 дюйма) — предел видимости человеческого глаза, вооруженного микроскопом. Остальные 99,999999999999% объема иона занимают 10 электронов на своих орбиталях.

Ядро натрия содержит 11 протонов и 12 нейтронов (**рис. 16.1.2**). Масса каждой из этих ядерных частиц, или нуклонов, в 2000 раз больше массы электрона, так что 99,975% массы ионов натрия сосредоточено в ядре. Таким образом, несмотря на огромную роль, которую электроны играют в химии и свойствах вещества, их вклад в массу иона крайне незначителен. Ион — это по большей части пустое пространство, слегка заполненное расплывчатыми орбиталями электронов и с крошечным шариком ядра в центре

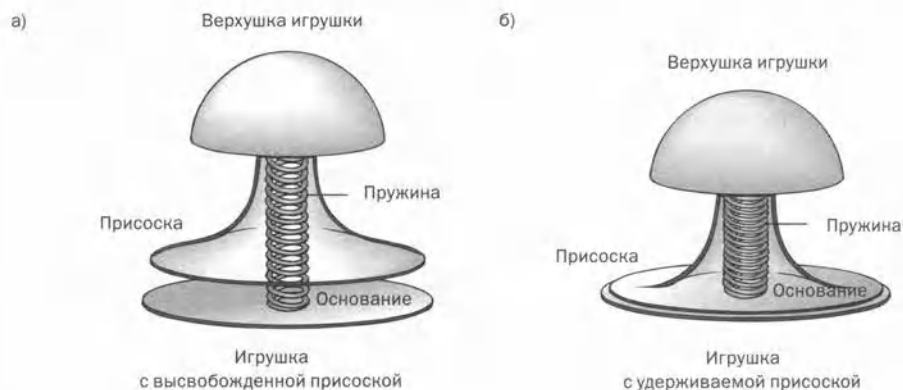
На нуклоны, из которых состоит ядро, действуют две противоположные силы. Первая — хорошо знакомая нам электростатическая сила отталкивания между одноименными электрическими зарядами. Поскольку каждый протон обладает единичным положительным зарядом, протоны постоянно стремятся вытолкнуть друг друга из ядра. Однако существует вторая сила — сила притяжения, которая и удерживает частицы вместе. Эта сила называется ядерной, и на малых расстояниях она преобладает над более слабым электростатическим отталкиванием. Но ядерные силы притягивают нуклоны друг к другу, только если те соприкасаются. Стоит их разъединить, как каждый оказывается сам по себе.

Конкуренция между этими двумя силами — силой электростатического отталкивания между одноименными зарядами и ядерной силой притяжения между нуклонами — аналогична тому, что происходит с игрушкой-попрыгунчиком (**рис. 16.1.3** и **16.1.4**). У нее есть присоска, прикрепленная к пружине, так что пружина все время пытается отделить верхнюю часть игрушки от основания, а присоска — удержать две части вместе. Если разъединить две части, чтобы они оказались на некотором расстоянии, действует только сила пружины. Но когда эти две части соприкасаются, начинает действовать присоска, которая удерживает их вместе.

Своим эффектом попрыгунчик обязан непрочности присоски. Она понемногу пропускает воздух и в конце концов отделяется, что позволяет пружине вы-



**Рис. 16.1.4.** Попрыгунчик запасает энергию при сжатии пружины и сохраняет эту энергию все время, пока присоска прикреплена к основанию. Когда присоска отделяется, игрушка подпрыгивает.



**Рис. 16.1.3.** (а) Благодаря наличию пружины и присоски игрушка вдруг подпрыгивает после долгого ожидания. (б) После того как вы сжимаете вместе две части игрушки, совершая над ними работу и создавая в пружине запас энергии, пружина пытается отделить верхушку от основания, а присоска — удержать две части вместе. Накопленная энергия высвобождается, когда из-за негерметичности присоска в конце концов позволяет пружине разжаться.



бросить игрушку вверх. Но предположим, что присоска непроницаема. Однажды соединенные, части игрушки никогда не разделятся, и пружина будет сохранять свою накопленную энергию до бесконечности. Чтобы отделить присоску, вам придется сдвинуть ее с основания. Только тогда пружина сможет выпустить свою накопленную энергию.

По сути, энергетический барьер не даст игрушке с непроницаемой присоской подпрыгнуть. Пока вы не проделаете над ней работу — не сдвинете присоску с основания, она не сможет выпустить свою накопленную энергию. Другой пример системы, которая нуждается в энергии, чтобы освободить энергию, — бутылка шампанского. Вы должны потянуть пробку, чтобы помочь ей выскочить из горлышка. После небольшого исходного вложения энергии, ее высвободится много больше, когда газ “выстрелит” пробкой через всю комнату.

В похожем положении находится и ядро. Ядерная сила притяжения не дает ему распасться на части, несмотря на огромное количество содержащейся в нем электростатической потенциальной энергии. Ядерная сила создает энергетический барьер, который предотвращает разъединение нуклонов. Если в ядро откуда-нибудь не поступит энергия, чтобы помочь нуклонам избавиться от ядерных сил, ядро навсегда останется целостным. Во всяком случае, так утверждает классическая физика.

Однако на поведение ядра влияет еще и квантовая физика. Одно из многих особых следствий квантовой теории — то, что вы никогда не можете точно сказать, где именно находится тело или как долго оно там будет находиться. Эта неясность является выражением принципа неопределенности Гейзенберга, согласно которому некоторые пары физических величин, например координаты и импульс или энергия и время, не полностью независимы и не могут быть определены одновременно с точностью, превышающей некоторое предельное значение. Этот принцип обусловлен тем, что любой объект по своей природе является отчасти волной и отчасти частицей. Поскольку волны, как правило, занимают некоторую область пространства, а не сосредоточены в одной точке, объект обычно не имеет строго определенных координат.

Чем меньше масса объекта, тем он “неуловимее” и тем сильнее проявляется неопределенность его местонахождения. Так, неопределенно расположенные нуклоны в ядре, как правило, остаются связанными друг с другом в течение очень долгого времени. Однако всегда есть мизерный шанс, что на какое-то время они окажутся на таком расстоянии друг от друга, где ядерные силы уже не действуют. Тогда нуклоны освободятся друг от друга и под действием электростатического отталкивания начнут разлетаться в разные стороны — такой процесс называется радиоактивным распадом. Квантовый процесс, который позволяет нуклонам победить ядерные силы без предварительного получения энергии, необходимой для преодоления энергетического барьера, называется туннелированием, потому что нуклоны эффективно преодолевают барьер, словно по туннелю, хотя их энергия меньше высоты барьера. Мы впервые столкнулись с квантовым туннелированием в разделе 12.2, когда увидели, что для стирания флеш-памяти необходимо, чтобы электроны преодолели изолирующий барьер — слой диэлектрика.

Естественный радиоактивный распад носит случайный характер. Хотя за определенный промежуток времени половина большой группы одинаковых радиоактивных ядер обязательно подвергнется распаду, невозможно предсказать, какие именно из исходных ядер уцелеют. Из-за этой неопределенности радиоактивный распад характеризуется только периодом полураспада — временем, необходимым для того, чтобы распалась половина ядер. Если вы дождетесь конца второго периода полураспада, останется только четверть от исходного количества ядер (половина половины). После третьего периода останется одна восьмая (половина половины половины) и так далее.

Такое уменьшение группы в два раза на каждом следующем периоде полураспада является одним из видов экспоненциального распада. Как правило, доля ядер, оставшихся неизменными после заданного промежутка времени, или доля выживших ядер равна одной второй, возведенной в степень “время, деленное на период полураспада”, или:

$$\text{Доля выживших частиц} = \left(\frac{1}{2}\right)^{\text{прошедший промежуток времени/период полураспада}} \quad (16.1.1)$$

Хотя большинство радиоактивных ядер имеют короткий период полураспада и ненадолго задерживаются в окружающей среде, существует несколько радиоактивных элементов с периодом полураспада в миллиарды лет. Именно эти долгоживущие радиоактивные ядра, в частности урана и тория, оставшиеся с момента образования Земли, достаточно часто встречаются в природе. Именно они дали толчок развитию ядерного оружия.

## Распад и синтез: деление ядра и термоядерная реакция

Чем больше в ядре протонов, тем сильнее они отталкиваются друг от друга и тем больше шансов, что они вызовут радиоактивный распад. Добавление к ядру дополнительных нейтронов уменьшает это протон-протонное отталкивание за счет увеличения размера ядра без роста его положительного заряда. Однако добавление слишком многих нейтронов также дестабилизирует ядро по причинам, о которых мы поговорим в следующем разделе. Таким образом, построение устойчивого ядра требует точкой балансировки.

Когда в ядре всего несколько протонов, ядерная сила притяжения намного превышает электростатическую силу отталкивания. Нуклоны крепко держатся друг за друга. Такое ядро можно сравнить с прыгающей игрушкой со слабой пружиной и мощной присоской: однажды собранные вместе, составные части никогда не распадаются. В сущности, средняя энергия связи нуклонов (энергия, необходимая для расщепления ядра на отдельные нуклоны, деленная на число нуклонов) увеличивается бы, даже если бы в этом ядре было еще больше протонов и нейтронов.

В ядре с многочисленными протонами электростатическое отталкивание настолько сильно, что ядерные силы не могут долго удерживать нуклоны вместе. Эти ядра быстро распадаются. Они похожи на попрыгунчиков с сильной пружиной и маленькой присоской. Средняя энергия связи нуклонов увеличивалась бы, если бы в таком ядре было меньше протонов и нейтронов.

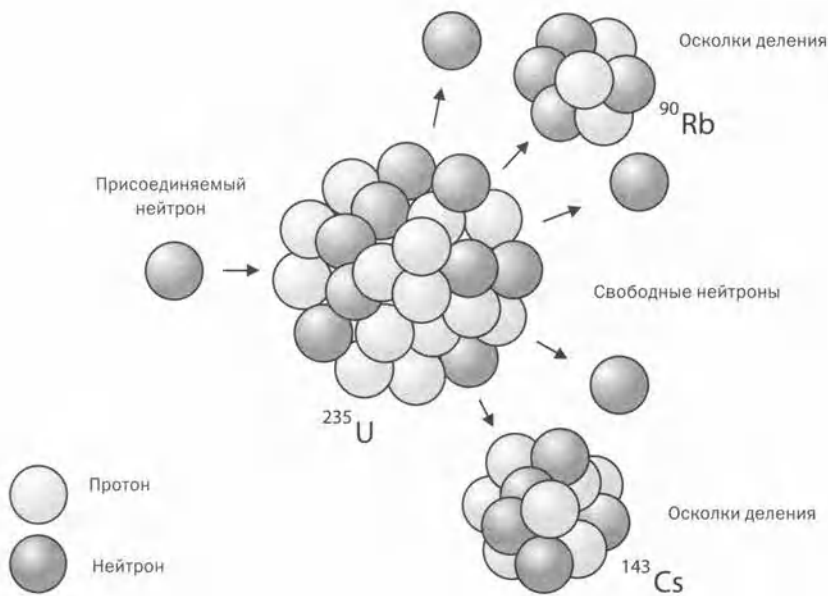
Промежуточный вариант между двумя рассмотренными крайностями — ядро, в котором примерно 26 протонов и ядерная сила уравновешивается электростатической силой отталкивания. Такие ядра чрезвычайно устойчивы, и среднюю энергию связи нуклонов нельзя увеличить путем добавления или уменьшения их числа. Меньшие ядра могут высвободить потенциальную энергию путем увеличения размера до этого промежуточного значения, в то время как более крупные ядра могут высвободить потенциальную энергию, уменьшаясь в размере до той же промежуточной величины.

Чтобы маленькие ядра начали расти, им нужно откуда-то взять еще нуклонов. Электростатическое отталкивание вначале будет мешать росту ядра, но как только нуклоны соприкоснутся, ядерные силы свяжут частицы вместе с одновременным выделением огромного количества потенциальной энергии. Этот процесс слияния называется термоядерным синтезом или термоядерной реакцией.

Чтобы уменьшить большое ядро, нужно каким-то образом разъединить его составные части, чтобы вывести их из поля досягаемости ядерных сил. После этого электростатические силы будут отталкивать фрагменты друг от друга и высвобождать большое количество потенциальной энергии. Этот процесс распада называется делением или расщеплением ядра.

Количество энергии, которое выделяется при термоядерном синтезе небольших ядер или делении больших, несопоставимо велико по сравнению с энергией химических реакций. В процессе распада крупного ядра урана около 0,1% его массы преобразуется в энергию. Миниатюрное ядро атома водорода при слиянии с другим ядром водорода преобразует в энергию около 0,3% своей массы. В пересчете на килограмм в ядерных реакциях выделяется приблизительно в 10 миллионов раз больше энергии, чем в химических. К счастью, ядерные реакции гораздо труднее осуществить.

Вооружившись этой вводной информацией, давайте проследим историю открытий конца XIX — начала XX века. Естественный радиоактивный распад был случайно обнаружен французским физиком Антуаном Анри Беккерелем (1852–1908) в 1896 году. Он заинтересовался рентгеновским излучением, которое было открыто в то время, и начал искать материалы, способные испускать рентгеновские лучи под действием света. К своему удивлению, Беккерель обнаружил,



**Рис. 16.1.5.** При столкновении нейтрона с ядром атома урана высока вероятность того, что ядро распадется на части. Этот процесс называется вынужденным делением. Среди осколков вынужденного деления есть и другие нейтроны.

что уран засвечивает фотопластинки даже через непрозрачный экран и даже без воздействия света. Вскоре его результаты подтвердили и дополнили французские ученые: родившаяся в Польше Мария Кюри (1867–1934) и ее муж химик Пьер Кюри (1859–1906). Они открыли несколько новых радиоактивных элементов, в том числе полоний (названный так в честь родной страны Мари) и радий.

В 1911 году английский физик Эрнест Резерфорд (1871–1937) открыл, что атомы имеют ядра. Затем он обнаружил, что при бомбардировке высокоэнергетическими ядрами гелия атомные ядра иногда распадаются. В 1932 году другой британский физик, Джеймс Чедвик (1891–1974), открыл ядерную частицу нейтрон, который не имеет электрического заряда и поэтому может приблизиться к ядру, не испытывая электростатического отталкивания. Вскоре было обнаружено, что нейтроны могут присоединяться к ядрам многих атомов.

Но решающим открытием, которое сделало возможным создание атомной бомбы, стало деление ядра под действием нейтронов. В 1934 году итальянский физик Энрико Ферми (1901–1954) и его коллеги занимались особой разновидностью процесса радиоактивного распада — так называемым бета-распадом. Они присоединяли нейтроны к ядрам всех атомов, которые были в их распоряжении. Присоединив нейтроны к огромному ядру урана, исследователи заметили образование неких очень недолговечных радиоактивных систем. Ученые решили, что наблюдают образование сверхтяжелых ядер, и даже начали придумывать названия для новых элементов.

Однако четыре года спустя, австрийские физики Лиза Мейтнер (1878–1968) и Отто Фриш (1904–1979) вместе с немецкими химиками Отто Ганом (1879–1968) и Фрицем Штрассманом (1902–1980) показали, что то, что сделала группа Ферми, на самом деле было расщеплением урана на более легкие ядра (см. **1** и **рис. 16.1.5**). В числе осколков этого вынужденного деления было много нейтронов, которые могли вызвать дальнейший распад других ядер урана.

## Цепная реакция и атомная бомба

Физики быстро поняли, что возможна ядерная цепная реакция — реакция, при которой деление одного ядра урана вызывает деление двух соседних ядер урана, оно, в свою очередь, вызывает деление четырех других ядер урана, и так далее (**рис. 16.1.6**). В результате развивается лавинообразный ядерный процесс, в котором многие или даже большинство ядер в образце урана расщепляются и выделяют невероятное количество энергии.

После этого оставшаяся работа по созданию как атомной, так и водородной бомбы становится уже, как говорится, делом техники. Чтобы воплотить замысел бомбы, необходимо выполнить всего четыре условия:

**1** Уроженка Австрии, физик Лиза Мейтнер в 1907 году переехала в Берлин, где вскоре началось ее 30-летнее сотрудничество с химиком Отто Ганом. В 1934 году она убедила Гана присоединиться к ней в изучении ядерных процессов. Вдвоем им удалось продвинуться очень далеко. Из-за своего еврейского происхождения Мейтнер вскоре была лишена возможности заниматься наукой в нацистской Германии и в 1938 году бежала в Швецию. Переписываясь с Ганом, Мейтнер продолжала направлять их совместную работу. Через несколько месяцев после ее отъезда Ган и его помощник Фриц Штрассман обнаружили, что при нейтронном облучении тяжелых элементов образуются более мелкие, а не более крупные ядра. На основании этих данных Мейтнер и ее племянник Отто Фриш разработали модель ядерного деления. Тем не менее Ган, якобы чтобы не привлекать внимания нацистов, опубликовал результаты под своим именем, не включив Мейтнер в состав авторов. Как следствие, в 1944 г. Нобелевская премия по химии была присуждена одному Гану, который продолжал утверждать, что Мейтнер была просто его помощницей и не играла ведущей роли в их совместной работе. В возмещение этой вопиющей несправедливости в 1994 году элемент 109 получил название мейтнерий.

1. В бомбе должен быть источник нейтронов, чтобы инициировать взрыв.
2. Ядра элементов, из которых состоит бомба, должны обладать способностью расщепляться, то есть делиться при соударении с нейтроном.
3. В каждом вынужденном делении должно испускаться больше нейтронов, чем поглощаться.
4. Бомба должна эффективно использовать испускаемые нейтроны: каждое вынужденное деление в среднем должно вызывать более одного последующего деления.

Выполнить первое условие было легко. Многие радиоактивные элементы испускают нейтроны. Но вот со вторым и третьим оказалось сложнее. Именно здесь на сцене появился уран. Было известно, что уран может делиться и при этом испускает больше нейтронов, чем поглощает.

Но не все ядра урана одинаковы. Ядро урана обязательно должно содержать 92 протона, потому что совместно с 92 электронами при этом образуется нейтральный атом, который обладает всеми химическими свойствами урана (U на рис. 14.2.4). А вот число нейтронов в этом ядре может быть разным. Ядра, которые отличаются только количеством нейтронов, называются изотопами. Естественные изотопы урана бывают двух видов:  $^{235}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$ , где верхний левый индекс обозначает количество нуклонов в каждом ядре. Легко подсчитать, что ядро  $^{235}\text{U}$  содержит 92 протона и 143 нейтрона, в общей сложности 235 нуклонов. В то же время ядро  $^{238}\text{U}$  содержит 238 нуклонов: 92 протона и 146 нейтронов.

Из этого следует, что для бомбы годится только  $^{235}\text{U}$ . Этот изотоп менее стабилен, чем  $^{238}\text{U}$ , потому что в нем больше доля протонов. Из-за этого ядерным силам труднее удерживать их вместе, даже с учетом разбавляющего влияния 143 нейтронов. Как и многие богатые протонами ядра,  $^{235}\text{U}$  рано или поздно подвергается альфа-распаду — он испускает ядра гелия ( $4\text{He}$ ), теряя при этом два протона и два нейтрона. Период полураспада  $^{235}\text{U}$  составляет примерно 710 миллионов лет. Однако при соударении с нейтроном  $^{235}\text{U}$  мгновенно распадается, и в этом процессе вынужденного деления высвобождается в среднем 2,5 нейтрона.

По сравнению со своим более легким родственником,  $^{238}\text{U}$  немного стабильнее: его период полураспада — четыре с половиной миллиарда лет. Важно, что его ядро поглощает большую часть нейтронов, не подвергаясь делению. Вместо этого оно претерпевает ряд сложных изменений и в конце концов превращается в плутоний — не существующий в природе элемент. Ядро  $^{239}\text{Pu}$  содержит 94 протона и 145 нейтронов. Как мы вскоре увидим, плутоний тоже используется для изготовления ядерного оружия.

Таким образом,  $^{238}\text{U}$  фактически замедляет, а не поддерживает цепную реакцию. Так как развивать цепную реакцию может только изотоп  $^{235}\text{U}$ , природный уран, прежде чем использовать в бомбе, нужно разделить. Однако  $^{235}\text{U}$  — весьма редкий изотоп. Земной запас ядер урана образовался очень давно при вспышке умирающей звезды. Взрываясь, сверхновая звезда до такой степени нагревает ядра мелких атомов, что при столкновениях они соединяются. При синтезе урана энергия сверхновой оказалась заперта внутри его ядер. Они появились при образовании Земли 4–5 миллиардов лет назад, и с тех пор идет их радиоактивный распад. В природе сохраняются в некотором количестве лишь изотопы урана —  $^{235}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$ . Поскольку  $^{235}\text{U}$  менее стабилен, его доля в запасах природного урана снизилась очень сильно — до 0,72%. Остальные 99 с лишним процентов составляет  $^{238}\text{U}$ .

Отделить  $^{235}\text{U}$  от  $^{238}\text{U}$  чрезвычайно трудно. Поскольку атомы, содержащие эти два ядра, отличаются лишь массой, но не химическими свойствами, их можно разделить только при помощи методов, основанных на сравнении масс. А коль скоро разность атомных масс изотопов относительно невелика, извлечение  $^{235}\text{U}$  из природного урана требует поистине героических усилий. Во время Второй мировой и позже, в период холодной войны, правительство США построило огромные заводы по разделению двух изотопов урана. Необходимость в сложных установках — одно из основных препятствий на пути распространения ядерного оружия.

Последнее условие поддержания цепной реакции — эффективное использование нейтронов: каждое деление должно вызывать в среднем более одного следующего деления. Это означает, что взрывчатое вещество бомбы не может непроизводительно поглощать нейтроны, а также не может позволить слишком многим из

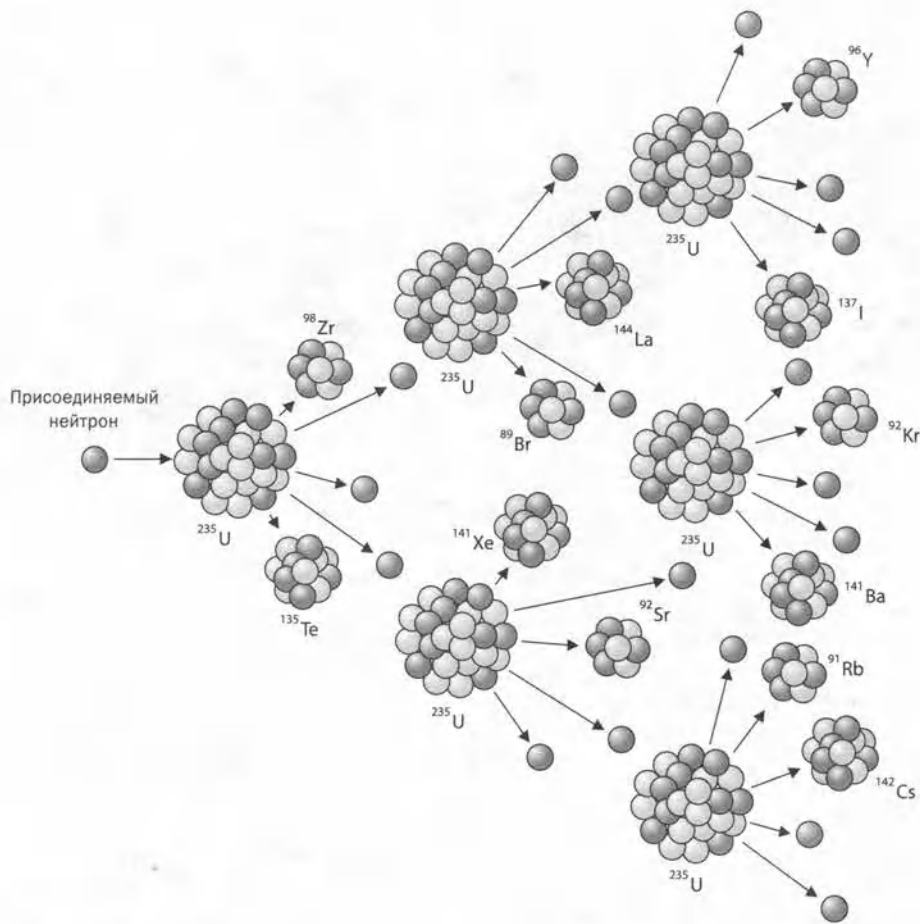


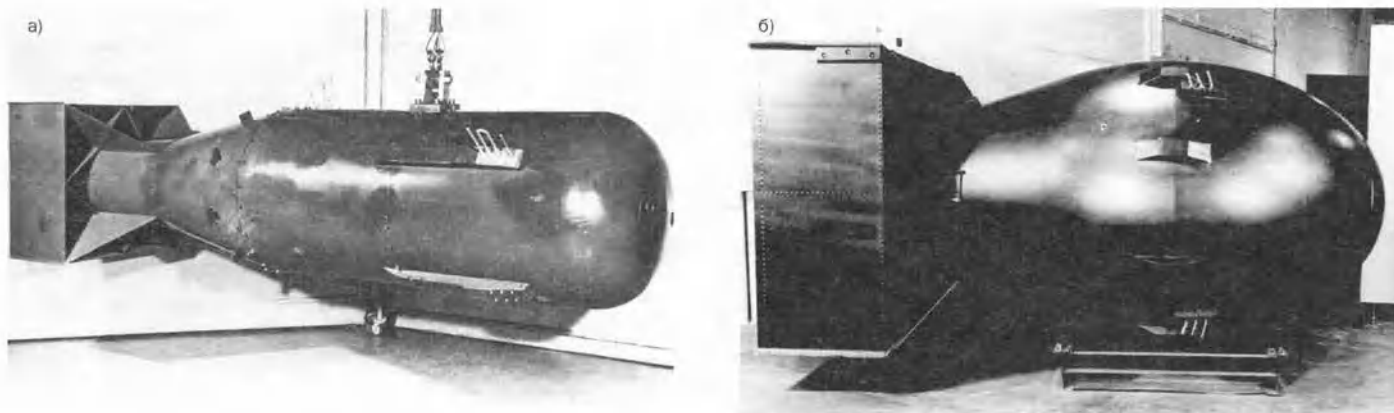
Рис. 16.1.6. Цепная реакция начинается, когда осколки одного распавшегося ядра инициируют деление по крайней мере еще одного ядра (в среднем). Особенно легко такая цепная реакция происходит при распаде  $^{235}\text{U}$ , легкого изотопа урана, где каждое распавшееся ядро выделяет в среднем 2,5 нейтрона.

них ускользнуть, не вызвав деления. Образец относительно чистого  $^{235}\text{U}$  не поглощает нейтроны без пользы, но он может потерять много нейтронов, если они вылетят наружу через его поверхность. Чтобы цепная реакция осуществилась, образец должен быть достаточно большим, чтобы высока была вероятность того, что каждый нейтрон столкнется с ядром до того, как покинет образец. Кроме того, образец должен иметь минимальную поверхность. Этим условиям удовлетворяет шар.

Но насколько велик должен быть этот шар? Поскольку атомы представляют собой в основном пустое пространство, нейтрон может углубиться в кусок урана на несколько сантиметров, так и не столкнувшись ни с одним ядром. Например, из образца урана размером с мяч для гольфа слишком много нейтронов выходит без соударения. Критическая масса шара из  $^{235}\text{U}$ , необходимая для начала цепной реакции, составляет около 52 кг (115 фунтов), диаметр — 17 см (7 дюймов). В этом случае каждое деление будет вызывать в среднем еще одно следующее деление. Но чтобы произошел взрыв, должна начаться разветвленная цепная реакция, в которой каждое деление вызывает в среднем гораздо больше, чем еще одно деление. Для этого необходимо дополнительное количество  $^{235}\text{U}$  — сверхкритическая масса. В данном примере хватило бы 60 кг (132 фунта).

К 1945 году ученые и инженеры, участвовавшие в Манхэттенском проекте, нашли способы выполнить все четыре условия и были готовы осуществить взрывную цепную реакцию. Они накопили достаточно  $^{235}\text{U}$ , чтобы достичь сверхкритической массы. Тщательно обработанные блоки  $^{235}\text{U}$  были рассчитаны так, чтобы соединиться в момент взрыва. Когда критическая масса будет достигнута, несколько инициирующих нейтронов должны начать цепную реакцию. Когда масса урана станет сверхкритической, лавинообразное деление быстро превратит его в огромный огненный шар.

Однако сборка бомбы оказалась достаточно сложной. Сверхкритическая масса должна быть полностью готова прежде чем цепная реакция пойдет слишком далеко, в противном случае бомба может перегреться и взорваться прежде, чем расщепится достаточное количество ядер. Для чистого  $^{235}\text{U}$  время между двумя последу-

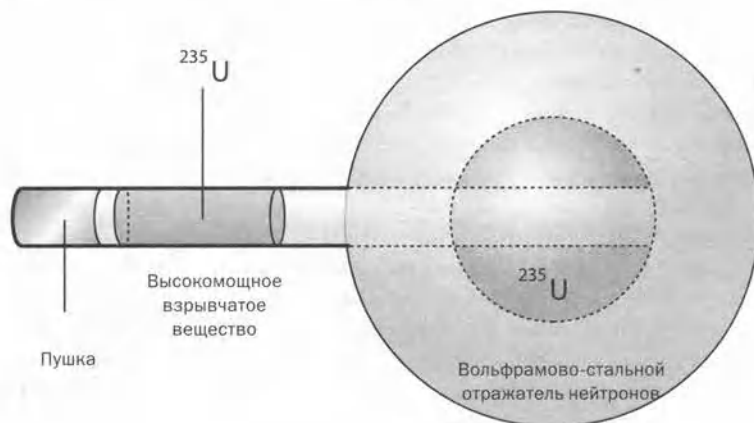


**Рис. 16.1.7.** (а) В бомбе “Малыш” пушка выстреливала цилиндром из урана в цилиндрическую полость в урановом шаре. (б) В бомбе “Толстяк” используются взрывчатые вещества, чтобы сдвинуть шар из плутония до плотности намного выше нормальной. “Малыш” уничтожил Хиросиму, “Толстяк” — Нагасаки.

ющими делениями составляет всего лишь около 10 наносекунд (10 миллиардных долей секунды). Когда распад происходит в сверхкритической массе, количество делений в каждом следующем поколении сильно возрастает, поэтому значительная часть ядер урана распадается всего за несколько десятков поколений. Вся взрывная цепная реакция занимает менее чем миллионную долю секунды, причем основная часть энергии выделяется за последние несколько поколений деления (около 30 нс).

Чтобы завершить сборку (объединение блоков для создания сверхкритической массы) до взрыва бомбы, нужно было действовать чрезвычайно быстро. В бомбе на основе  $^{235}\text{U}$  “Малыш” (рис. 16.1.7, а), которая взорвалась над Хиросимой 6 августа 1945 г. в 8:15 утра и унесла жизни около 200 тысяч японцев, для образования сверхкритической массы цилиндр из  $^{235}\text{U}$  выстреливал из ствола пушки и входил в приготовленный для него в урановом шаре полый канал (рис. 16.1.8). Когда цилиндр заполнял канал, завершалось формирование уранового шара массой 60 кг. Шар находился внутри оболочки из стали и карбида вольфрама, задачей которой было не дать сборке разлететься после начала взрыва. Сразу же начиналась взрывная цепная реакция, и к тому моменту, когда взрывался урановый шар, успевало расщепиться 1,3% ядер  $^{235}\text{U}$ . При этом выделялась энергия, эквивалентная взрыву приблизительно 15 кило тонн тротила.

**Рис. 16.1.8.** Концепция “Малыша” была проста: шар из урана-235 был разделен на две части так, что ни одна из них не достигала критической массы. Одна часть представляла собой сферу с цилиндрической полостью, другая — цилиндр, который заполнял эту сферу. При взрыве детонатора пушка выстреливала цилиндр в полость шара, таким образом создавалась сверхкритическая масса и инициировалась взрывная цепная реакция.



На самом деле этот был не первый взрыв ядерной бомбы. Конструкция “Малыша” была настолько надежной, а необходимый для него запас  $^{235}\text{U}$  — настолько бесценным, что “Малыша” сбросили без испытаний. Одновременно в рамках Манхэттенского проекта была разработана гораздо более сложная бомба на основе плутония. Уверенности в том, что эта бомба сработает, было гораздо меньше, поэтому сначала ее испытали.

В “Штучке”, — так называлась первая атомная бомба — уран-235 не использовался. Вместо этого применялся плутоний, который был синтезирован в ядерном реакторе при распаде урана-238. В ядерном реакторе осуществляется управляемая цепная реакция деления урана, в которой нейтроны могут преобразовать  $^{238}\text{U}$  в  $^{239}\text{Pu}$ .

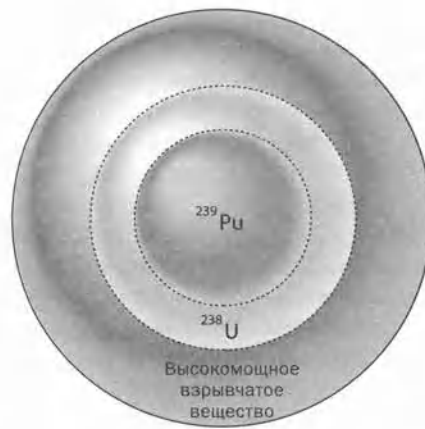


Рис. 16.1.9. В бомбах “Штучка” и “Толстяк” использовалась довольно сложная сборка. При помощи специально разработанных взрывчатых веществ производился направленный внутрь взрыв, который сдвигал шар из плутония-239 (размером с бейсбольный), помещенный в нейтронный отражатель — оболочку из урана-238. При сжатии до очень высокой плотности масса плутония быстро становилась сверхкритической, инициируя взрывную цепную реакцию.

Как и  $^{235}\text{U}$ , изотоп  $^{239}\text{Pu}$  удовлетворяет всем требованиям для создания бомбы. Его ядро относительно нестабильно, период полураспада — всего 24,4 тысячи лет. При соударении с нейтроном  $^{239}\text{Pu}$  легко расщепляется и при этом испускает в среднем 3 нейтрона. Таким образом,  $^{239}\text{Pu}$  вполне подходит для осуществления цепной реакции. Критическая масса плутониевого шара составляет около 10 кг (22 фунта), диаметр — около 10 см (4 дюйма).

Но с  $^{239}\text{Pu}$  есть некоторые проблемы. Он настолько радиоактивен и в процессе деления испускает так много нейтронов, что цепная реакция развивается почти мгновенно. В результате на сборку сверхкритической массы плутония остается гораздо меньше времени, чем в урановой бомбе. Пушечная сборка не может быть использована, потому что плутоний будет перегреваться и взорвется еще до того, как цилиндр полностью войдет в сферу.

Из-за этого пришлось применить гораздо более сложную схему сборки. Направленный внутрь взрыв более 2000 кг высокомогущной взрывчатки подверг сильнейшему сжатию шар из плутония (рис. 16.1.9), находившийся внутри “Штучки” (рис. 16.1.10). Это произошло 16 июля 1945 года в 5:29 утра в Аламогордо, штат Нью-Мексико. Сама по себе масса шара — 6,1 кг (13,4 фунта) — была меньше критической. Но шар был окружен отражателем нейтронов, так называемым

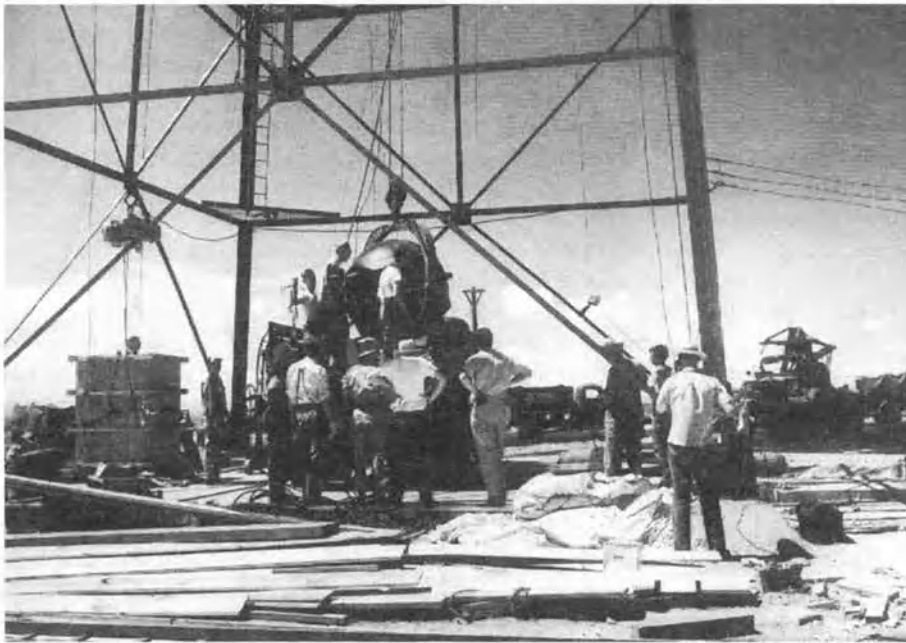


Рис. 16.1.10. Первая атомная бомба с кодовым названием “Штучка” была взорвана 16 июля 1945 г. на полигоне, расположенном в пустыне неподалеку Аламогордо, штат Нью-Мексико. На этой фотографии участники сверхсекретного Манхэттенского проекта устанавливают плутониевую бомбу на башню.

тампером, выполненным из  $^{238}\text{U}$ . Массивные ядра  $^{238}\text{U}$  отражают многие нейтроны обратно в плутоний, подобно тому, как в боулинге шары отскакивают от кеглей. В процессе направленного внутрь взрыва происходило сжатие плутония до значений, во много раз превышающих его нормальную плотность. Когда ядра плутония сильнее прижимались друг к другу, возрастала вероятность того, что в них попадут нейтроны и произойдет деление.

Схема сработала. Последовавшая цепная реакция привела к распаду 17% ядер плутония и выделению энергии, эквивалентной взрыву 22 кило тонн тротила. Башня и другое оборудование на месте испытаний, названных “Тринити”, просто испарились, и песок пустыни на сотни метров вокруг превратился в стекло. Того же типа было устройство “Толстяк” (рис. 16.1.7), сброшенное 9 августа 1945 года на японский город Нагасаки. В результате взрыва погибли около 140 тысяч человек.

В годы, последовавшие за первыми взрывами атомных бомб, усилия ученых были сосредоточены в основном на усовершенствовании сборки, то есть на способах соединения расщепляющегося вещества. Чем больше времени пройдет до того, как сверхкритическая масса перегреется и взорвется, тем большая часть ядер распадется, и тем выше будет мощность взрыва. Метод сжатия, опробованный в “Штучке” и “Толстяке”, был взят за основу, и постепенно бомбы становились все меньше и все эффективнее использовали свой ядерный заряд. Процесс направленного внутрь взрыва (имплозивная схема) позволял сократить количество плутония, необходимого для достижения сверхкритической массы, что давало возможность создавать атомные бомбы очень небольшого размера. Самая маленькая атомная бомба “Дэви Крокетт” весила всего около 23 кг (50 фунтов).

## Термоядерная, или водородная, бомба

Расщепляющиеся вещества начинают взрываться, как только их масса превышает критическую. Таким образом, критическая масса ограничивает размер и потенциальную взрывную мощность атомной бомбы. Пытаясь обойти это ограничение, ученые-ядерщики вернулись к малым ядрам и научились извлекать энергию из их соединения.

При взрыве атомной бомбы на Земле впервые были достигнуты температуры, которые до этого можно было наблюдать только в космосе. Звезды получают большую часть своей энергии при слиянии ядер водорода с образованием ядра гелия. В этом процессе высвобождается громадное количество энергии. Поскольку ядра водорода — это протоны, которые с огромной силой отталкивают друг друга, в обычных земных условиях водород не вступает в реакцию термоядерного синтеза. Чтобы вызвать слияние протонов, нужно каким-то образом приблизить их друг к другу на достаточно малое расстояние, чтобы ядерные силы смогли удержать их вместе. Единственный известный нам практический способ сблизить ядра — нагреть их настолько, чтобы они сталкивались. Именно это и происходит в термоядерной бомбе, которую также называют водородной.

В водородной бомбе сперва взрывается атомная бомба. При этом некоторое количество водорода нагревается приблизительно до 100 миллионов градусов по Цельсию (рис. 16.1.11). При столь высокой температуре ядра водорода начинают сталкиваться друг с другом. Чтобы облегчить процессы ядерного синтеза, используют тяжелые изотопы водорода: дейтерий ( $^2\text{H}$ ) и тритий ( $^3\text{H}$ ). В то время как обычное ядро атома водорода ( $^1\text{H}$ ) содержит только протон, ядро дейтерия содержит протон и нейтрон, а ядро трития — протон и два нейтрона. Когда ядро дейтерия сталкивается с ядром трития, они образуют ядро гелия ( $^4\text{He}$ ) и высвобождают один свободный нейтрон. Поскольку в этом процессе около 0,3% от первоначальной массы преобразуется в энергию, ядро гелия и нейтрон с огромной скоростью разлетаются в стороны.

Так как водород, даже в огромных количествах, самопроизвольно не взрывается, водородная бомба может быть сколь угодно большой. Для подрыва водородной бомбы используется атомная, но верхнего предела размеров водородной бомбы не существует. Несколько огромных термоядерных бомб были созданы и испытаны в самом начале холодной войны. Как правило, эти бомбы состояли из атомного детонатора и термоядерного заряда, окруженного оболочкой-отражателем из урана-238. Оболочка удерживает водородное топливо после начала термоядерной реакции. Когда уже идет реакция преобразования дейтерия и трития





**Рис. 16.1.11.** Термоядерная бомба высвобождает энергию при слиянии ядер дейтерия ( $^2\text{H}$ ) и трития ( $^3\text{H}$ ), в результате чего образуется гелий ( $^4\text{He}$ ) и нейтроны. Термоядерный синтез инициируется путем нагревания водорода до температуры более чем 100 миллионов градусов при помощи взрыва атомной бомбы. Образующиеся при синтезе быстрые нейтроны затем вызывают в урановой оболочке реакцию деления, при которой высвобождается еще больше энергии. Взаимодействуя с нейтронами, литий ( $^6\text{Li}$ ) производит тритий.

в гелий и нейтроны, нейтроны сталкиваются с ядрами  $^{238}\text{U}$  оболочки-отражателя. Эти быстрые нейтроны обладают такой высокой энергией, что вызывают деление ядер  $^{238}\text{U}$ , что приводит к дополнительному выделению большого количества энергии. В итоге такую схему иногда называют деление-синтез-деление\*.

Разновидностью этой бомбы является так называемая нейтронная бомба. В этой бомбе отсутствует оболочка из урана-238, поэтому образующиеся при синтезе быстрые нейтроны распространяются и облучают все вокруг в зоне взрыва. Облучение смертельно для человека, но относительно слабый взрыв производит меньше разрушений.

Тритий — радиоактивный изотоп, синтезированный в ядерных реакторах. Чтобы быть устойчивым, у него слишком много нейтронов, поэтому он постепенно превращается в легкий изотоп гелия ( $^3\text{He}$ ). Поскольку период полураспада трития — 12,3 года, термоядерные заряды на основе трития нужно периодически обновлять.

Во многих водородных бомбах вместо газообразных дейтерия и трития используется твердый дейтерид лития. Это соединение представляет собой соль, содержащую литий ( $^6\text{Li}$ ) и дейтерий ( $^2\text{H}$ ). Когда нейтрон от ядерного детонатора сталкивается с ядром  $^6\text{Li}$ , образуются ядра гелия ( $^4\text{He}$ ) и трития ( $^3\text{H}$ ). В бомбе дейтерид лития быстро превращается в смесь дейтерия, трития и гелия, которая затем подвергается термоядерной реакции.

## Тепловое излучение, проникающая радиация, заражение местности

Ядерное оружие взорвалось — расщепляющиеся вещества начали распадаться, термоядерные вещества вступили в реакцию синтеза. Что дальше? Во-первых, огромное количество ядер и субатомных частиц вылетает из области взрыва, многие почти со скоростью света. Эти частицы врезаются в близлежащие атомы и молекулы, нагревая их до фантастических температур. Вокруг бомбы возникает огненный шар. Эти же частицы ответственны за поражение радиационным излучением (проникающую радиацию).

Во-вторых, в результате взрыва возникает вспышка света, отчасти вызванная процессами деления и синтеза, отчасти происходящая от раскаленного огненного шара. Вспышка содержит не только видимый свет, но и весь диапазон электромагнитного спектра от инфракрасного и ультрафиолетового до рентгеновских и гамма-лучей. Эти лучи сжигают все вокруг, снаружи и внутри.

\* Именно по такой схеме проектировалась советская бомба АН602 с расчетной мощностью более 100 мегатонн в тротиловом эквиваленте. Однако из-за большого уровня радиоактивного загрязнения внешний слой урана убрали. Полученная термоядерная авиационная бомба, называемая «Царь-бомбой» и «Кузькиной матерью», имела мощность от 57 до 58,6 мегатонны в тротиловом эквиваленте. Это самое мощное взрывное устройство за всю историю человечества. Она была испытана в 1961 году. Огненный шар взрыва достиг радиуса примерно 4,6 километра, а сейсмическая волна, возникшая в результате взрыва, три раза обогнула земной шар.

\* На самом деле ударная волна в отличие от звуковых волн распространяется со скоростью, превышающей скорость звука.

В-третьих, взрыв создает вокруг огненного шара гигантский скачок давления воздуха. Ударная волна со скоростью звука\* распространяется во все стороны от огненного шара, разрушая все на своем пути на значительном расстоянии. В-четвертых, разреженный и перегретый воздух под действием подъемных сил устремляется вверх, создавая характерное грибовидное облако.

Но самое коварное последствие ядерного взрыва — образование, выброс и выпадение продуктов распада, радиоактивных ядер. В процессе деления уран и плутоний расщепляются на более мелкие ядра. Каждое новое ядро получает от расщепленного несколько десятков протонов и некоторое число нейтронов. Новые ядра притягивают электроны и становятся обычными на первый взгляд атомами, такими как йод или кобальт. Но в то время как крупным ядрам вроде урана нужны дополнительные нейтроны, чтобы снизить влияние протонов и уменьшить электростатическое отталкивание, средним и маленьким ядрам вроде йода или кобальта столько нейтронов не нужно. В результате у новых ядер имеется избыток нейтронов, и, как следствие, они радиоактивны. Периоды их полураспада колеблются в интервале от тысячных долей секунды до тысяч лет.

До того как они начинают распадаться, такие атомы очень трудно отличить от обычных. Они представляют собой радиоактивные изотопы обычных атомов, поэтому наши организмы доверчиво пропускают их внутрь и включают в состав тканей. Там они и остаются, до поры до времени выполняя поставленные организмом биохимические задачи. Но рано или поздно эти радиоактивные атомы распадаются и выделяют ядерную энергию. Каждый радиоактивный распад, который происходит рядом с нами или внутри нас, высвобождает едва ли не в миллион раз больше энергии, чем обычная химическая связь, поэтому радиоактивные процессы вызывают химические изменения в наших клетках. Они могут убивать клетки или искажать их генетическую информацию, что может привести к развитию онкологических заболеваний.

При взрыве превращение элементов — когда в результате перестройки ядер атомы одного элемента образуют другой — происходит неконтролируемо и производит смертельно опасную смесь нестабильных изотопов. Распад этих изотопов занимает годы и десятилетия, и нам остается только ждать. Даже ядерное оружие невысокой взрывной мощности, так называемые грязные бомбы, может загрязнить окружающую среду радиоактивным мусором. Подобные смеси радиоактивных изотопов образуются в ядерных реакторах, из-за чего проблема утилизации отработанного ядерного топлива остается столь острой.

В то же время радиоактивные изотопы нашли широкое применение в медицине и биохимии, где они приносят огромную пользу и спасают жизни. Кроме того, путем контролируемой ядерной реакции можно целенаправленно получать желаемые изотопы, а не случайный набор. Но это чрезвычайно сложные и дорогостоящие процессы. Мечта алхимиков о превращении свинца в золото близка к осуществлению, но это будет стоить так дорого, что вряд ли поможет обогатиться.

---

### **Распространенное заблуждение: излучение и радиоактивность**

**Заблуждение:** Любой материал, например пища, подвергнутый воздействию любого вида излучения — микроволновой печи, радио, инфракрасного или ультрафиолетового света, может стать радиоактивным.

**На самом деле:** Для того чтобы вещество стало радиоактивным, необходимо изменить ядра его атомов, сделав их нестабильными. Такое изменение требует несопоставимо большего количества энергии, чем может обеспечить любой из вышеперечисленных низкоэнергетических фотонов. Единственные виды электромагнитного излучения, обладающие достаточной энергией, чтобы повлиять на атомные ядра, — это гамма-лучи, а иногда и рентгеновские.

---

## **Метод радиоуглеродного анализа**

---

Распад ядер углерода-14, или  $^{14}\text{C}$ , как и всех радиоактивных изотопов, подчиняется экспоненциальному закону. Период полураспада углерода-14 — около 5730 лет. Это значит, что по прошествии 5730 лет около половины ядер из большой группы

ядер  $^{14}\text{C}$  распадется. За следующие 5730 лет распадется половина оставшихся ядер и так далее. В соответствии с формулой 16.1.1, уравнение деления изотопа  $^{14}\text{C}$  можно представить в виде:

$$\text{Количество оставшихся атомов} = \text{исходное количество атомов} \times \left(\frac{1}{2}\right)^{\text{прошедшее промежуток времени}/5730} \quad (16.1.1).$$

В нулевой момент времени доля оставшихся атомов равна  $(1/2)^0$  или 1, и количество оставшихся атомов равно их исходному количеству. Через 5730 лет доля оставшихся атомов составляет  $(1/2)^1$  или  $1/2$ , и количество оставшихся ядер  $^{14}\text{C}$  составляет половину от первоначального. Еще через 5730 лет (в общей сложности через 11 460 лет от нулевого момента или точки отсчета) доля оставшихся составляет  $(1/2)^2$  или  $1/4$ , количество оставшихся атомов — четверть от их исходного количества. И так далее до бесконечности.

Чтобы произвести расчеты, не нужно ждать конца очередного целого периода полураспада. Снижение количества оставшихся ядер  $^{14}\text{C}$  является экспоненциальной функцией времени. Если вам известно исходное количество ядер  $^{14}\text{C}$  в некий момент времени и то, сколько времени прошло с этого момента, вы можете предсказать, сколько ядер еще не распалось. Но еще интереснее, что если вы знаете, каково было исходное количество ядер  $^{14}\text{C}$  в начальный момент времени и каково оно сейчас, то вы можете примерно определить, сколько времени прошло с этого начального момента. На этом и основан метод радиоуглеродной датировки.

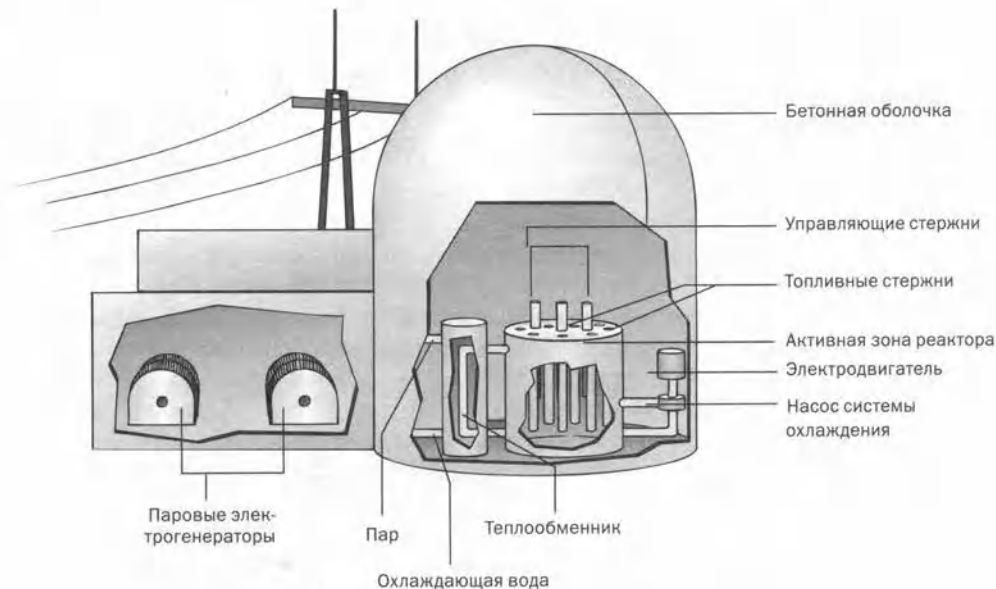
Углерод-14 образуется в нашей атмосфере с постоянной скоростью при взаимодействии космических лучей с атомами азота. Химически неотличимые от обычных ядер углерода, изотопы  $^{14}\text{C}$  усваиваются растениями в процессе фотосинтеза. Таким образом  $^{14}\text{C}$  попадает в пищевую цепь. Любой живой организм, который получает питательные вещества при помощи фотосинтеза или питается другими фотосинтезирующими организмами, будет содержать изотоп  $^{14}\text{C}$ . Что еще важнее, этот изотоп будет составлять определенную долю содержащегося в организме углерода.

Пока организм жив, отношение количества  $^{14}\text{C}$  к количеству обычных ядер углерода будет примерно постоянным. Но как только организм умирает, это отношение начнет понижаться. Каждый раз, когда распадается ядро  $^{14}\text{C}$ , соотношение чуть-чуть падает. Через 5730 лет это соотношение составляет половину того, что было в момент смерти организма. Через 11 460 лет оно падает до четверти от своего первоначального значения. Точно измеряя отношение содержания изотопа  $^{14}\text{C}$  к содержанию обычного углерода в останках организма, можно определить, как давно этот организм умер.

Этим методом можно определить возраст органических материалов вплоть до 50 000 лет и даже более\*. Дерево, одежда, кожа, семена и другие органические остатки могут быть датированы со значительной точностью. Небольшие отклонения связаны с возможными колебаниями скорости образования  $^{14}\text{C}$  в атмосфере, а также с тем, что некоторые растения отдают предпочтение определенным изотопам углерода. Последнее замечание отражает тот факт, что тезис о "химической неразличимости" разных изотопов углерода не всегда абсолютно верен. Некоторым растениям удается сконцентрировать один изотоп чуть в большей степени, чем другой, и такое предпочтение делает метод радиоуглеродного анализа более сложным и менее точным. Тем не менее это очень полезный, достаточно достоверный и широко распространенный метод определения возраста органических образцов.

В сочетании с методом определения возраста деревьев по годичным кольцам радиоуглеродный метод становится еще более точным. У живых деревьев образуются годичные кольца, которые различаются по толщине в зависимости от погоды. Сравнивая современные деревья с теми, что погибли в недавнем или далеком прошлом, ученые собрали временные ряды годичных колец и образцы древесины за тысячи лет. Эти образцы позволяют измерить содержание углерода-14 в растительном материале, относящемся к любому году из временного ряда. Данные о точном содержании углерода-14 в образцах известного возраста служат сравнительной базой при определении "года рождения" новых находок.

\* После написания книги в 2010 году точность метода повысилась, и теперь можно определить возраст органических остатков до 60 000 лет.



## 16.2 Ядерные реакторы

Создание оружия — не единственный путь, открывшийся перед учеными-ядерщиками и инженерами в конце 1930-х годов. Конечно, цепные реакции ядерного деления и термоядерного синтеза могут выпустить на свободу невероятную разрушительную энергию, но они же могут стать едва ли не безграничным источником полезной энергии. Управляя теми же цепными реакциями, которые происходят в ядерном оружии, люди научились использовать ядерную энергию для созидания. За полвека, минувших с момента их изобретения, ядерные реакторы деления вышли на высокий технологический уровень и стали одним из наших основных источников энергии. Получение полезной энергии путем термоядерного синтеза — по-прежнему труднодостижимая цель, но усилия в этом направлении продолжаются.

### Ядерные реакторы деления

Достижение критической массы урана (критическая сборка) не всегда приводит к взрыву. На самом деле вызвать большой взрыв не так просто. Конструкторам атомной бомбы пришлось придумать, как собрать не только критическую, но сверхкритическую массу и как проделать это меньше чем за миллионную долю секунды. Этот процесс быстрой сборки — не из тех, что можно запустить легко или случайно. Гораздо проще достигать критической массы постепенно — в этом случае уран просто сильно нагреется. В конечном итоге он может взорваться от перегрева, но при этом не превратит в пар все на много километров вокруг.

Медленная сборка критической массы — главный принцип реакторов ядерного деления. Их основным продуктом является тепло, которое чаще всего используется для выработки электроэнергии. Ядерный реактор деления гораздо проще построить и использовать, чем бомбу, в первую очередь потому, что для него не требуется такая высокая степень очистки расщепляющихся материалов. Более того, при помощи некоторых технологических приемов можно добиться того, чтобы ядерные реакторы работали на природном уране.

Для начала убедимся, что цепная реакция деления не всегда приводит к взрыву. Важно, насколько быстро растет скорость деления. В атомной бомбе это происходит стремительно. В момент детонации масса расщепляющихся материалов уже намного выше критической, и каждое деление в среднем вызывает уже не одно, а скорее два следующих деления. Промежуток между делениями составляет всего 10 наносекунд, а значит, каждые 10 нс скорость реакции может удваиваться. Менее чем за миллионную долю секунды большинство ядер в заряде расщепляются и выделяют энергию еще до взрыва.

Но если масса расщепляющегося вещества не превышает критическую, а точно равна ей, все не так страшно. Каждое деление в среднем вызывает только одно следующее деление. Поскольку каждое поколение делений просто воспроизводит предыдущее, скорость реакции расщепления остается почти постоянной. Только самопроизвольные акты деления могут способствовать ее росту. Расщепляющееся вещество равномерно выделяет тепловую энергию, которую можно использовать для питания электрического генератора.

Одной из главных составных частей ядерного реактора является активная зона с ядерным топливом. Конструкция активной зоны такова, что масса топлива очень близка к критической. Несколько нейтронопоглощающих стержней, погруженных в активную зону (их еще называют стержнями регулирования мощности реактора или просто управляющими), регулируют, насколько эта масса выше или ниже критической. Если управляющие стержни извлечь из активной зоны, увеличится вероятность того, что каждый нейтрон инициирует деление, что способствует достижению сверхкритического состояния — другими словами, реактор сместится к надкритичности. Погружение управляющих стержней в активную зону, наоборот, увеличивает вероятность поглощения нейтрона до того, как он вызовет деление, поэтому смещает реактор к подкритичности (снижению массы ниже критической).

Для поддержания скорости деления на нужном уровне ядерный реактор использует обратную связь. Если скорость деления становится слишком низкой, то чтобы ее увеличить, система управления медленно вытягивает управляющие стержни из активной зоны. Если скорость деления становится слишком высокой, то чтобы ее понизить, система управления погружает управляющие стержни в активную зону. Это похоже на управление автомобилем. Когда вы едете слишком быстро, то ослабляете нажим на педаль газа; когда слишком медленно — то давите на педаль газа сильнее.

Аналогия с автомобилем хорошо иллюстрирует еще одно важное свойство реакторов. И автомобили, и реакторы относительно медленно реагируют на команды. Было бы трудно водить машину, которая мгновенно останавливается, как только вы убираете ногу с педали газа, или мгновенно разгоняется до сверхзвуковой скорости, как только вы нажимаете на газ. Точно так же нельзя было бы управлять реактором, который моментально останавливается при погружении управляющих стержней и так же быстро взрывается при их поднятии.

Но реакторы, как и автомобили, не торопятся реагировать на перемещение управляющих стержней. Причина в том, что после некоторых делений последние нейтроны выделяются очень медленно. При делении ядра  $^{235}\text{U}$  очень быстро испускается в среднем 2,47 нейтрона, которые в тысячную долю секунды вызывают следующие деления. Но некоторые из осколков деления — неустойчивые ядра, которые распадаются и высвобождают нейтроны спустя довольно долгое время после первоначального деления. В среднем каждое деление  $^{235}\text{U}$  производит 0,0064 запаздывающих нейтронов, которые затем вызывают другие деления. Появление запаздывающих нейтронов занимает несколько секунд или даже минут, так что они существенно замедляют отклик реактора. Скорость реакции деления в реакторе нельзя быстро увеличить, потому что запаздывающие нейтроны долго накапливаются. Скорость деления нельзя быстро снизить, потому что нужно много времени, чтобы израсходовались все запаздывающие нейтроны.

Чтобы упростить управление современными ядерными реакторами, в их схемы обязательно включают механизмы стабилизации и саморегулирования. При перегреве эти механизмы автоматически переводят активную зону в подкритическое состояние. Как мы увидим, в конструкции 4-го реактора Чернобыльской АЭС саморегулирование не было предусмотрено.

## Реакторы на тепловых нейтронах

Основная идея ядерного реактора проста: собрать критическую массу способного к ядерному распаду вещества — ядерного топлива — и регулировать его критичность, чтобы поддерживать постоянную скорость реакции деления. Но что может быть ядерным топливом? Для атомной бомбы нужны изотопы  $^{235}\text{U}$  или  $^{239}\text{Pu}$  довольно высокой чистоты. Но в ядерном реакторе деления можно использовать смесь  $^{235}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$  или даже природный уран. Хитрость заключается в использова-

нии тепловых, или медленных, нейтронов — частиц, кинетическая энергия которых зависит только от температуры.

В атомной бомбе из-за урана-238 возникали бы проблемы, потому что он захватывает быстрые нейтроны, испускаемые при делении  $^{235}\text{U}$ . Природный уран не может поддерживать цепную реакцию, потому что его многочисленные ядра  $^{238}\text{U}$  захватывают большую часть быстрых нейтронов до того, как они успевают вызвать деление редких ядер  $^{235}\text{U}$ . Уран должен быть высокообогащенным — часть изотопов  $^{238}\text{U}$  нужно извлечь, чтобы повысить содержание изотопа уран-235. В топливе должно быть гораздо больше  $^{235}\text{U}$ , чем в природном уране.

Но с медленными нейтронами, когда они попадают в природный уран, все обстоит иначе. По ряду сложных причин ядра  $^{235}\text{U}$  очень успешно выборочно выскивают и захватывают медленные нейтроны. Ядрам урана-235 настолько хорошо это удается, что они легко одерживают верх над более многочисленными ядрами урана-238. Даже в природном уране у медленных нейтронов выше вероятность быть захваченными ядрами  $^{235}\text{U}$ , чем  $^{238}\text{U}$ . В результате если все нейтроны медленные, то можно поддерживать цепную реакцию деления ядер и в природном уране.

Поскольку ядра  $^{235}\text{U}$  в процессе деления испускают быстрые нейтроны, природный или слегка обогащенный уран сам по себе не может использовать для поддержания цепной реакции медленные нейтроны. Однако в большинстве ядерных реакторов, помимо природного или какого-то другого урана, имеется еще кое-что. Наряду с ураном в реакторе содержится так называемый замедлитель нейтронов, который снижает их скорость так, чтобы ядра  $^{235}\text{U}$  могли их захватить. Быстрый нейтрон из делящегося  $^{235}\text{U}$  входит в замедлитель, мечется по нему примерно одну тысячную долю секунды и выходит из замедлителя уже как медленный нейтрон, у которого осталась только тепловая энергия. Затем он инициирует деление другого ядра  $^{235}\text{U}$ . В присутствии замедлителя даже природный уран может поддерживать цепную реакцию! Установки, работающие на медленных нейтронах, называются реакторами на тепловых нейтронах.

Хороший замедлитель должен отнимать у нейтрона энергию и импульс, не поглощая самого нейтрона. Когда нейтрон выходит из такого замедлителя, он обладает только тепловой энергией. Лучшими замедлителями считаются ядра, которые редко или никогда не поглощают нейтроны и не распадаются при столкновениях с ними. К ним относятся водород ( $^1\text{H}$ ), дейтерий ( $^2\text{H}$ ), гелий ( $^4\text{He}$ ) и углерод ( $^{12}\text{C}$ ). Когда быстрый нейтрон соударяется с ядром одного из этих атомов, это напоминает столкновение бильярдных шаров. Быстрый нейтрон передает часть своей энергии и импульса ядру, в результате нейтрон замедляется, а ядро ускоряется.

Очень эффективными замедлителями являются обычная вода, тяжелая вода (содержащая тяжелый изотоп водорода дейтерий  $^2\text{H}$ ) и графит (углерод). Они замедляют нейтроны до тепловых скоростей, при этом почти их не поглощая. Самый лучший замедлитель — тяжелая вода, которая быстро замедляет нейтроны и не поглощает их вовсе. Однако тяжелая вода дорого стоит, потому что дейтерий составляет только 0,015% атомов водорода и отделить его от обычного водорода очень трудно.

В первых реакторах в основном использовали графитовые стержни-замедлители, потому что графит — дешевый и легкий в обработке материал (см. ❶).

❶ Первый ядерный реактор CP-1 (“Чикагская поленница-1”) был построен на спортивной площадке Чикагского университета. Это был реактор на тепловых нейтронах. В каждый из графитовых блоков было заложено по две большие гранулы топлива из природного урана. 2 декабря 1942 г. “Поленница” была завершена и могла достичь критической массы при удалении управляющих стержней. Когда руководитель проекта Энрико Ферми приказал медленно извлечь последний управляющий стержень, реактор приблизился к критическому состоянию, начала расти эмиссия нейтронов. Был полдень, поэтому Ферми объявил знаменитый обеденный перерыв. Вернувшись, они продолжили с того места, на котором остановились. В 15:25 реактор достиг критической массы, эмиссия нейтронов начала расти в геометрической прогрессии. Реактор работал в течение 28 минут, после чего Ферми распорядился снова погрузить управляющие стержни в активную зону.

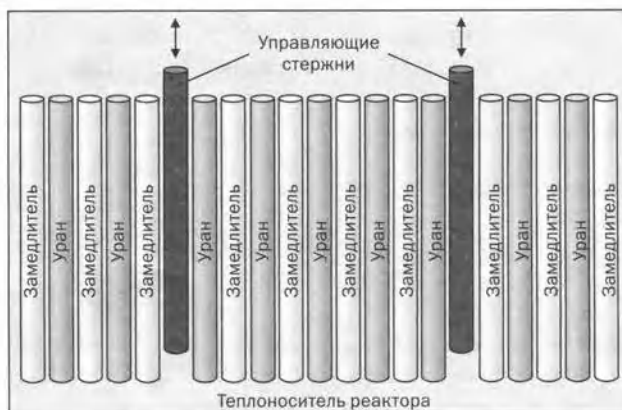
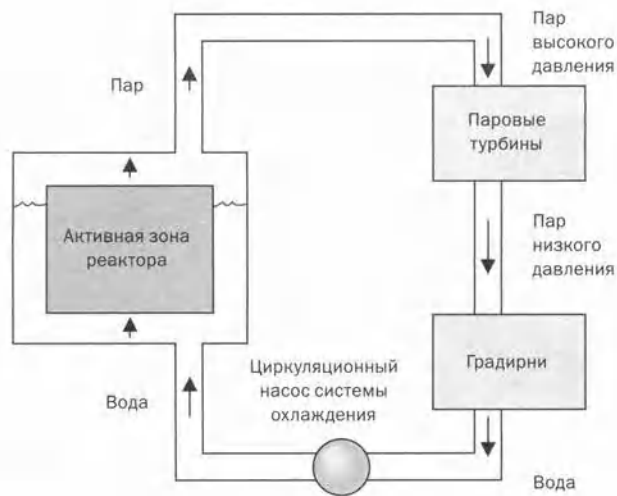


Рис. 16.2.1. Активная зона реактора на тепловых нейтронах включает топливные стержни, которые чередуются с замедлителями, снижающими скорость быстрых нейтронов и превращающими их в тепловые. Для регуляции скорости деления предусмотрены нейтронопоглощающие управляющие стержни. Для отвода тепла через активную зону пропускают охлаждающую жидкость, например воду.



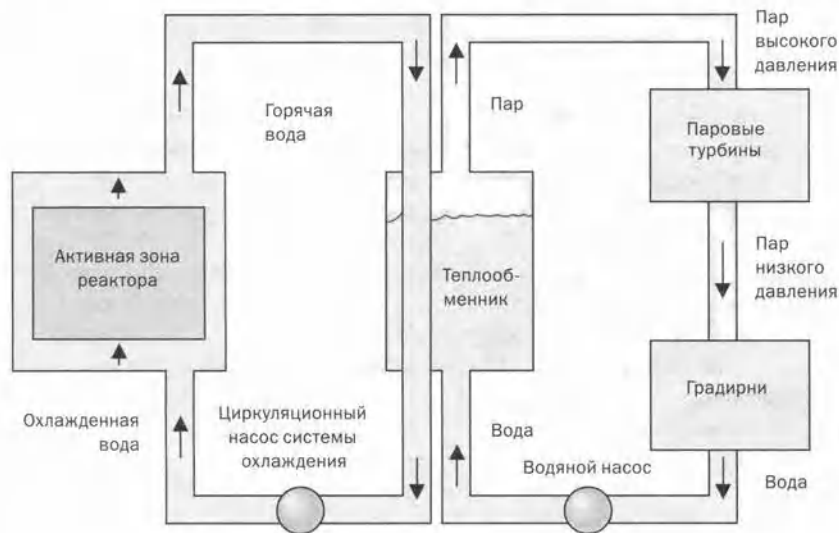
**Рис. 16.2.2.** В кипящем водяном реакторе охлаждающая вода кипит внутри активной зоны, образуя пар высокого давления, который приводит в действие паровые турбины и электрогенератор. Отработанный пар конденсируется в градирне и затем поступает обратно в реактор.

Но так как графит в качестве замедлителя менее эффективен, чем тяжелая вода, графитовые реакторы должны были быть очень большими. Кроме того, графит — горючее вещество, что отчасти и стало причиной двух из трех самых крупных мировых аварий реакторов.

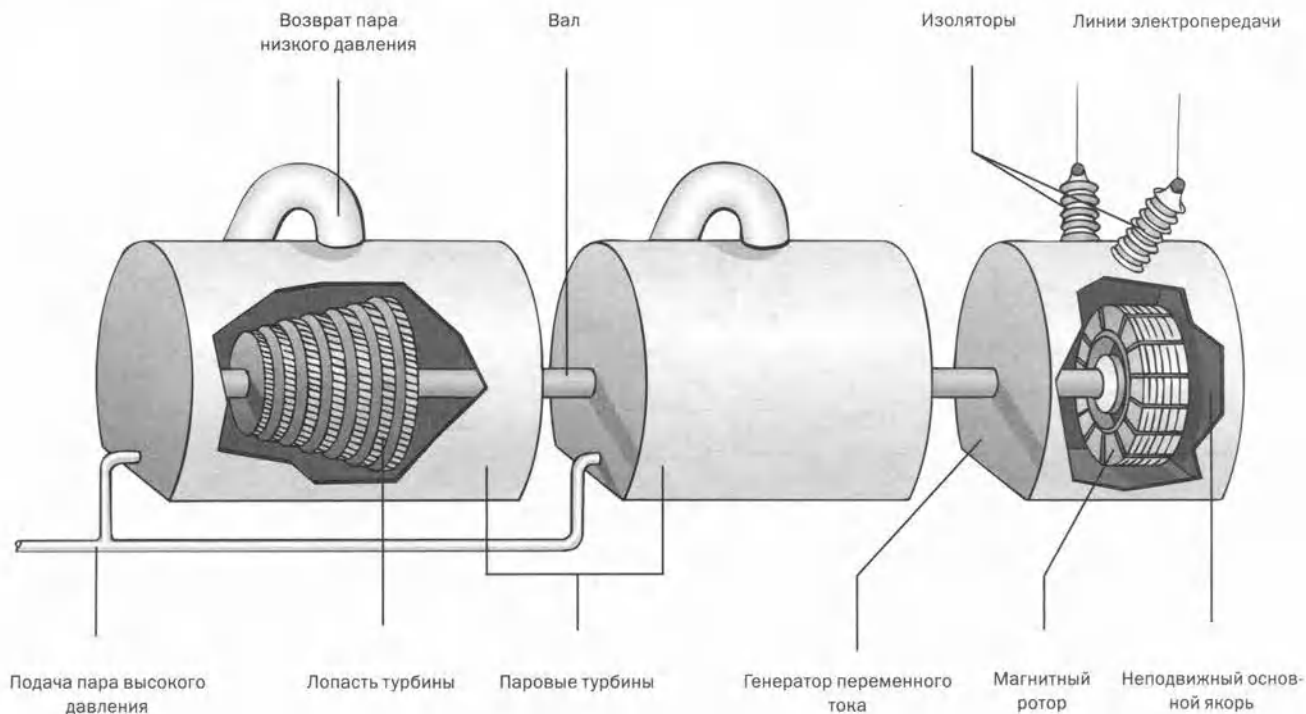
Обычная, или «легкая», вода дешева, безопасна и эффективна как замедлитель, но поглощает слишком много нейтронов, чтобы ее можно было использовать с природным ураном. Чтобы легкая вода работала в паре с ураном, последний нужно немного обогатить, хотя бы до концентрации 2–3%  $^{235}\text{U}$ .

Активная зона типичного реактора на тепловых нейтронах включает небольшие топливные гранулы из оксида урана ( $\text{UO}_2$ ), разделенные прослойками замедлителя (рис. 16.2.1). Ядро  $^{235}\text{U}$  при делении испускает нейтрон, который, как правило, выходит из одной гранулы, превращается в медленный нейтрон в замедлителе, а затем вызывает деление ядра  $^{235}\text{U}$  уже другой топливной гранулы. Поглощая некоторую часть нейтронов, управляющие стержни позволяют определить, в каком состоянии — подкритическом, критическом или надкритическом — находится активная зона. Ядра  $^{238}\text{U}$  в реакторе по большей части исполняют роль зрителей, так как в основном распаду подвергаются ядра  $^{235}\text{U}$ .

На практике из промышленных реакторов нужно каким-то образом отводить выделяемое тепло. Во многих реакторах через активную зону с большой скоростью пропускают охлаждающую воду. Тепло переходит в воду, ее температура повышается. В кипящем водяном реакторе вода закипает непосредственно в активной зоне реактора, образует пар высокого давления, который приводит в движение турбины электрогенератора (рис. 16.2.2). В реакторе с водой под давлением (их еще называют ВВЭР — водо-водяной энергетический реактор) вода находится под таким высоким давлением, что не может кипеть (рис. 16.2.3). Вместо этого



**Рис. 16.2.3.** В реакторах с водой под давлением находящаяся под высоким давлением вода первого контура отводит тепло из активной зоны. В теплообменнике эта вода первого контура передает тепло воде второго контура, которая использует его для выработки электроэнергии. Вода второго контура закипает, превращается в пар высокого давления, который вращает соединенные с электрогенератором паровые турбины. Пар конденсируется в жидкую воду и возвращается в теплообменник за новой порцией тепла.



**Рис. 16.2.4.** Пар высокого давления из активной зоны кипящего водяного реактора или из теплообменника реактора с водой под давлением поступает в паровые турбины. Там он совершает работу над лопастями турбин, при этом теряя давление и температуру. Выйдя из турбины уже как пар низкого давления, он направляется в градирню, где вновь конденсируется в жидкую воду, которая возвращается в оборот для повторного использования. Механическая энергия вращения турбины приводит в действие генератор, вырабатывающий переменный ток.

она под напором подается во внешний теплообменник, где тепло передается воде, текущей по другому контуру. Получив тепло, эта вода закипает и образует пар высокого давления, который приводит в действие генератор (рис. 16.2.4).

Правильно сконструированные реакторы на тепловых нейтронах с водяным охлаждением обладают собственной устойчивостью. Охлаждающая вода фактически работает еще и как замедлитель. Если реактор перегревается и вода выходит из активной зоны, замедлителя становится недостаточно, чтобы снизить скорость всех нейтронов. Ядра  $^{238}\text{U}$  начинают поглощать быстрые нейтроны, и цепная реакция замедляется или останавливается.

## Реакторы на быстрых нейтронах

Реакторы на тепловых нейтронах работают на простом топливе и имеют относительно несложную конструкцию. Но в них распадаются только ядра  $^{235}\text{U}$ , в то время как ядра  $^{238}\text{U}$  остаются почти без изменений.

Предвидя, что настанет день, когда запасы  $^{235}\text{U}$  истощатся, некоторые страны разработали и построили реакторы другого типа, не требующие замедлителей. В происходящих в них цепных реакциях участвуют быстрые нейтроны, поэтому они так и называются — реакторы на быстрых нейтронах.

Реактор на быстрых нейтронах можно сравнить с управляемой атомной бомбой, в том числе и потому, что ему требуется топливо из высокообогащенного урана. Тогда как реактор на медленных нейтронах может обойтись природным ураном или обогащенным до концентрации 2–3%  $^{235}\text{U}$ , топливо для реактора на быстрых нейтронах должно содержать 25–50%  $^{235}\text{U}$ . В этом случае ему хватает ядер для поддержания цепной реакции.

Но у реакторов на быстрых нейтронах есть немаловажный побочный эффект. Ядра  $^{238}\text{U}$  захватывают много быстрых нейтронов и превращаются в ядра  $^{239}\text{Pu}$ . Таким образом, реактор производит не только тепло, но и плутоний. Из-за этого реакторы на быстрых нейтронах часто называют реакторы-размножители — они создают другое ядерное топливо. Рано или поздно  $^{239}\text{Pu}$  может заменить  $^{235}\text{U}$  в качестве основного топлива для реактора.

Реактор на медленных нейтронах тоже производит некоторое количество плутония, который, как правило, прямо в реакторе и разлагается, однако реактор на быстрых нейтронах производит его гораздо больше. Поскольку плутоний



может быть использован для создания ядерного оружия, отношение к реакторам на быстрых нейтронах противоречиво. Но так как эти реакторы преобразуют обычно бесполезный  $^{238}\text{U}$  в расщепляющееся вещество, следует признать, что, по сравнению с реакторами на медленных нейтронах, реакторы на быстрых гораздо эффективнее используют природный уран.

Отсутствие в конструкции замедлителей создает еще одну трудность. Дело в том, что реакторы на быстрых нейтронах не могут охлаждаться водой: если использовать воду, она будет действовать как замедлитель нейтронов. Вместо этого такие реакторы, как правило, охлаждаются жидким металлическим натрием. Ядро натрия-23 редко взаимодействует с быстрыми нейтронами поэтому не замедляет их.

## Безопасность и аварии ядерных реакторов

Одна из главных проблем в случае с ядерными реакторами — контроль радиоактивных отходов. Все, что так или иначе контактирует с активной зоной реактора или испускаемыми нейтронами, становится в той или иной степени радиоактивным. Топливные гранулы быстро засоряются всевозможными осколками деления, которые включают радиоактивные изотопы многих распространенных элементов. Некоторые из этих радиоактивных изотопов растворимы в воде или газах, и все они требуют чрезвычайно осторожного обращения.

Первая линия обороны против утечек радиоактивности — толстая и прочная защитная оболочка реактора. Поскольку основная часть радиоактивных материалов остается в активной зоне реактора или в охлаждающей жидкости, эта часть изолирована защитной оболочкой. Когда ядерное топливо удаляют для переработки, внимательно следят за тем, чтобы не произошла утечка радиоактивных веществ.

Другая серьезная проблема — безопасная эксплуатация самих реакторов. Как у любого оборудования, в работе реакторов случаются разные сбои и неполадки, но безопасный реактор должен справляться с ними, чтобы они не приводили к катастрофе. Для этого в реакторах предусмотрены системы аварийного охлаждения, клапаны сброса давления и многие другие способы остановки реактора. Например, введение в активную зону раствора бората натрия охлаждает ее и останавливает все цепные реакции. Ядра бора, входящие в борат натрия, очень хорошо поглощают нейтроны и являются главным компонентом большинства управляющих стержней. Но самый надежный способ обеспечить безопасность реактора — предусмотреть в конструкции систему автоматической остановки при перегреве.

За последние полвека в мире произошло три крупных аварии ядерных реакторов. Первая случилась в 1957 году в Уиндскейле, Великобритания, на одном из двух реакторов для производства плутония. В реакторе на медленных нейтронах применялись графитовые замедлители и воздушное охлаждение вместо водяного. Во время плановой остановки реактор перегрелся. Под влиянием интенсивного излучения реактора изменилась кристаллическая структура графита, в которой накопилось большое количество химической потенциальной энергии. Когда в процессе остановки началось резкое выделение этой энергии, графит загорелся и произошел выброс радиоактивных веществ.

Вторая серьезная авария произошла на острове Три-Майл в 1979 году. Там реактор с водой под давлением остановили по всем правилам, когда сломался насос, который перекачивает воду в контуре выработки электроэнергии. Хотя этот контур напрямую не связан с реактором, он играет важную роль в отводе тепла из активной зоны. Несмотря на то что реактор был остановлен при помощи управляющих стержней и цепная реакция прекратилась, образовавшиеся перед выключением радиоактивные ядра продолжали распадаться, высвобождая энергию. Из активной зоны все еще поступало тепло, из-за чего вода в охлаждающем контуре закипела и вышла наружу через клапан сброса давления, обнажив верхнюю часть активной зоны реактора. Из-за отсутствия охладителя произошел перегрев и активная зона оказалась очень серьезно повреждена. Часть воды из охлаждающего контура попала в негерметичное помещение, и содержащиеся в ней радиоактивные газы проникли в атмосферу.

Третья и самая страшная авария произошла на 4-м блоке Чернобыльской АЭС 26 апреля 1986 года. Установленный там реактор на медленных нейтронах

с водяным охлаждением и графитовыми замедлителями представлял собой гибрид реактора с водой под давлением и реактора с кипящей водой. Охлаждающая вода проходила через реактор под высоким давлением, но не закипала до поступления в турбогенератор.

Авария началась во время испытания аварийной системы охлаждения активной зоны. Перед началом испытаний операторы попытались уменьшить скорость ядерной реакции в реакторе. Однако в активной зоне накопилось много осколков деления, способных поглощать нейтроны, поэтому поддерживать цепную реакцию на пониженной скорости не удалось. Цепная реакция практически прекратилась. Чтобы ее возобновить, операторам пришлось извлечь большую часть управляющих стержней. Стержни приводились в движение электродвигателем, на то, чтобы вернуть их обратно в активную зону, требовалось около 20 секунд.

Затем операторы начали испытания, отключив охлаждающую воду. Реактор должен был немедленно остановиться при помощи управляющих стержней, но операторы уже отключили автоматический контроль, потому что не хотели еще раз перезапускать реактор. Без охлаждения активная зона реактора быстро перегрелась и вода внутри нее закипела. Вода действовала как замедлитель наряду с графитом, таким образом, в реакторе происходило избыточное замедление. Удаление воды, в сущности, стимулировало цепную реакцию, так как до этого вода поглощала часть нейтронов. Скорость деления стала увеличиваться.

Операторы поняли, что дело плохо, и начали останавливать реактор вручную. Но управляющие стержни погружались в активную зону слишком медленно, чтобы изменить ситуацию. Когда вода вышла из активной зоны, та перешла в "мгновенно-критическое" состояние. Для развития цепной реакции больше не нужны были нейтроны от распадающихся осколков деления — было вполне достаточно собственных быстрых нейтронов, испускаемых при делении  $^{235}\text{U}$ . Многократно удваиваясь каждую секунду, скорость реакции деления быстро взлетела до небес. Топливо раскалилось добела и расплавilo контейнеры, в которых оно содержалось. Взрывы различных химических веществ уничтожили защитную оболочку реактора, загорелись графитовые замедлители. Огонь полыхал десять дней, пока пожарники и летчики заливали обломки бетоном. Многие из этих героических людей умерли от лучевой болезни. В атмосферу были выброшены все радиоактивные изотопы и другие вредные вещества из сгоревшей активной зоны. Пришлось эвакуировать более ста тысяч человек.

Катастрофа на ядерном объекте Токаймура, Япония, не относится к разряду аварий ядерных реакторов, хотя она тоже связана с достижением критической массы и последовавшей в результате цепной реакцией. Примерно в 10:35 утра 30 сентября 1999 года работники радиохимического завода, принадлежащего компании *JCO Co., Ltd.* переливали раствор нитрата уранила в отстойник. Предназначенный для экспериментального реактора на быстрых нейтронах, содержащийся в растворе уран был обогащен до 18,8%  $^{235}\text{U}$ . Хотя все сооружения и оборудование были спроектированы так, чтобы предотвратить сборку критической массы, для экономии времени рабочие решили пренебречь инструкциями.

После того как через отверстие для отбора проб в бак из нержавеющей стали залили шесть или семь порций раствора нитрата уранила, в растворе была достигнута критическая масса. В баке в общей сложности находилось около 16,6 кг обогащенного урана. Произошла внезапная вспышка излучения. Температура воды резко подпрыгнула, раствор расширился, при этом масса урана упала ниже критической. Но по мере того как окружающая отстойник охлаждающая водяная рубашка отводила тепло от раствора, смесь снова приблизилась к критической массе. Прерывистая цепная реакция продолжалась в течение двадцати часов, после чего из охлаждающей рубашки слили воду, игравшую роль замедлителя нейтронов, и масса наконец упала ниже критической.

## Реакторы термоядерного синтеза

Ядерным реакторам деления требуется относительно редкое топливо: уран. Несмотря на огромные запасы урана в земной коре, этот элемент очень рассеян. Существует не так много месторождений высокосортных урановых руд, из которых можно относительно легко извлечь чистый уран или его соединения. Кроме того,

в ядерных реакторах деления образуется множество различных радиоактивных осколков деления, которые нужно безопасно утилизировать. Однако ученые до сих пор не сумели предложить комплексный проект безопасного захоронения или переработки отработанного ядерного топлива. Проблема в том, что эти отходы должны сотни тысяч лет оставаться там, где они никак не смогут повлиять на людей, животных и природные системы. Никто не знает, как и где столько времени хранить такие опасные материалы.

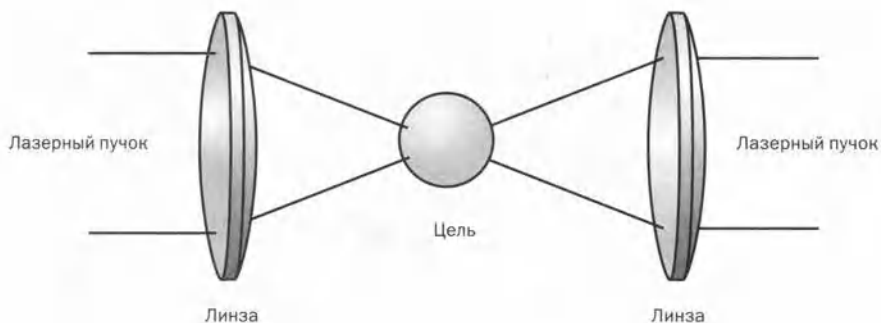
Альтернативой ядерному делению выступает термоядерный синтез. Соединяясь, ядра водорода могут образовывать другие, более тяжелые ядра. При этом выделяется огромное количество энергии. Однако синтез гораздо труднее начать, чем деление, потому что для этого нужно как минимум сделать так, чтобы два ядра оказались очень близко друг к другу. Оба ядра имеют положительный заряд и будут отчаянно отталкиваться друг от друга. Чтобы сблизить ядра настолько, чтобы они могли соединиться, требуется нагреть их до температуры более 100 миллионов градусов по Цельсию.

Очень сложная реакция соединения четырех ядер водорода ( $^1\text{H}$ ) с образованием одного ядра гелия ( $^4\text{He}$ ) — реакция ядерного синтеза — происходит на Солнце. Чтобы эта реакция произошла на Земле, нужны тяжелые изотопы водорода — дейтерий и тритий. Эти же изотопы используются в термоядерном оружии. Если смесь дейтерия и трития смешать и нагреть до 100 миллионов градусов, начинается слияние ядер и выделение энергии. Дейтерий и тритий превращаются в гелий и нейтроны.

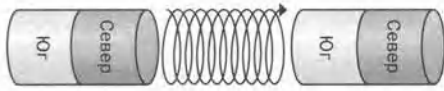
В отличие от реакций ядерного деления, термоядерный синтез не образует радиоактивных осколков. Сам тритий радиоактивен, но его можно легко переработать в топливо и держать в реакторе. Опасные нейтроны можно поймать при помощи blankets — так называется заготовка из металлического лития, который затем распадается на гелий и тритий. То, что свежий тритий образуется прямо на месте, весьма удобно, потому что в природе трития не существует, он образуется только в результате ядерных реакций. Таким образом, при термоядерном синтезе действительно образуется сравнительно мало радиоактивных отходов. Если испускаемые в процессе реакции нейтроны захватываются ядрами, которые при этом не становятся радиоактивными, то не будет происходить и радиоактивное загрязнение термоядерного реактора. Конечно, легче это сказать, чем сделать, но во всяком случае это лучше, чем реактор деления.

К сожалению, нагреть дейтерий и тритий до нужных температур и удержать их вместе достаточно долго, чтобы произошло слияние, не так просто. Пока что были опробованы два основных метода управляемого термоядерного синтеза: с инерционным удержанием плазмы и с магнитным удержанием плазмы.

При термоядерном синтезе с инерционным удержанием плазмы интенсивные импульсы лазерного света нагревают и сжимают крошечный шарик, содержащий дейтерий и тритий (рис. 16.2.5). Световые импульсы длятся лишь несколько триллионных долей секунды, но за это короткое время они выпаривают и перегревают поверхность шара. Поверхность взрывается и разлетается, при этом отталкивая внутреннюю часть шара. В результате ядро сжимают направленные к его центру гигантские реактивные силы, и оно взрывается. При сжатии температура ядра поднимается до значений, необходимых для начала синтеза. По сути, это крошечная термоядерная бомба, начальный разогрев которой обеспечивается лазерным импульсом.



**Рис. 16.2.5.** В экспериментах по инерционному термоядерному синтезу несколько лазерных лучей фокусируют на крошечном шарике, содержащем дейтерий и тритий. Эти сверхсильные лучевые импульсы сжимают и нагревают шар так, что происходит реакция термоядерного синтеза.



**Рис. 16.2.6.** Заряженная частица в магнитном поле между двумя магнитными полюсами под действием силы Лоренца совершает циклотронное движение. Она движется по спирали вокруг связывающих полюсы магнитных силовых линий. Частица не может выйти за пределы определенной области пространства.

На сегодняшний день опыты по инерционному термоядерному синтезу показали, что в реакцию вступает только небольшая часть ядер дейтерия и трития. Технология называется инерционным удержанием, потому что помимо сил инерции ничего не удерживает топливное ядро вместе. Лазерные лучи сжимают ядро, когда оно находится в свободном падении, и только собственная инерция сохраняет его, пока происходит синтез. К сожалению, лазеры и другие технологии, необходимые для осуществления инерционного термоядерного синтеза, весьма сложны и ненадежны, поэтому возможно, что это не слишком жизнеспособный метод получения энергии. Тем не менее эти эксперименты дают важную информацию о поведении термоядерных материалов при высоких температурах и давлениях.

Разрабатывается и другой метод управления термоядерной реакцией — магнитное удержание плазмы. Если достаточно сильно нагреть атомы водорода, они двигаются так быстро и ударяются друг о друга так сильно, что теряют электроны. Вместо газа, состоящего из атомов, образуется плазма — газ, состоящий из положительно заряженных ядер и отрицательно заряженных электронов. Плазма отличается от обычного газа тем, что на нее действует магнитное поле.

Как мы видели в разделе, посвященном телевидению, движущиеся заряженные частицы, как правило, совершают обороты вокруг линий магнитной индукции. Такое поведение называется циклотронным движением (**рис. 16.2.6**). Если магнитное поле, окружающее заряженную частицу, имеет строго определенную форму, заряженная частица окажется в его ловушке. Независимо от направления движения, заряженная частица будет двигаться по спирали вокруг магнитных силовых линий и не сможет вырваться.

Магнитное удержание позволяет при помощи электромагнитных волн нагревать плазму из дейтерия и трития до фантастических температур. Поскольку нагрев идет относительно медленно, важно не давать плазме терять тепло. Магнитная ловушка удерживает плазму от контакта со стенками контейнера, где плазма бы быстро остыла.

Одной из наиболее перспективных схем с магнитным удержанием является токамак (тороидальная камера с магнитными катушками). Основное магнитное поле токамака образует магнитный бублик, который в геометрии называется тороидом (**рис. 16.2.7**).

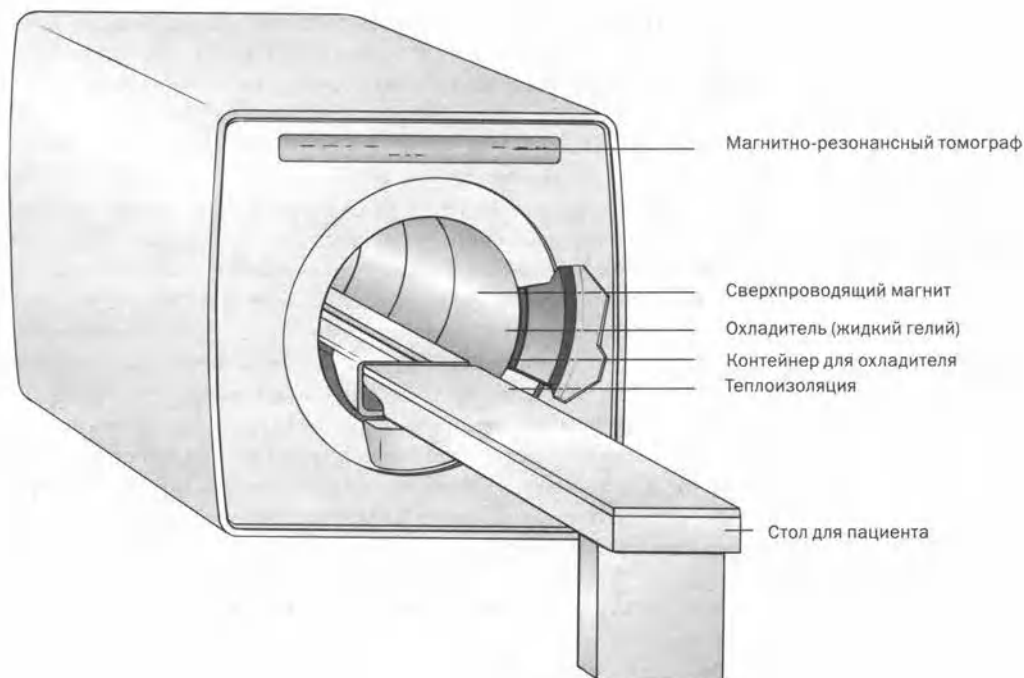
Внутри камеры тороидальной формы при пропускании электрического тока через намотанные на нее катушки формируется магнитное поле. Ядра внутри камеры двигаются по спирали вокруг магнитных силовых линий и не касаются стенок камеры. Они удерживаются внутри камеры и бесконечно описывают круги. Таким образом ядра можно нагреть до чрезвычайно высоких температур, при которых они могли бы сливаться.

В экспериментах в термоядерных реакторах с магнитным удержанием наблюдались заметные объемы синтеза (**рис. 16.2.7**). На короткое время они могут достичь теоретического порога самоокупаемости — состояния стабильности, когда в термоядерной реакции выделяется достаточно энергии, чтобы реактор мог сам поддерживать нужную температуру плазмы. Но эту технологию придется еще долго развивать и совершенствовать, чтобы преодолеть порог практической самоокупаемости, когда вся установка производит больше энергии, чем использует для собственных нужд.

**Рис. 16.2.7.** Реактор термоядерного синтеза токамак с магнитным удержанием плазмы состоит из камеры в форме бублика, внутри которой находится магнитное поле такой же формы. Частицы плазмы внутри камеры двигаются по спирали вокруг силовых линий магнитного поля. Поскольку плазма не касается стенок токамака, она сохраняет тепло и может достичь температуры, при которой возможно слияние ядер.



Реактор термоядерного синтеза токамак



## 16.3 Медицинская диагностика и радиация

Многие важнейшие открытия последних лет в области здравоохранения произошли на стыке медицины и физики. Когда ученые начали глубже понимать атомную и молекулярную структуру и научились управлять различными формами излучения, им удалось изобрести бесценные инструменты для диагностики и лечения заболеваний и травм. Прогресс продолжается, чуть ли не каждый день появляются новые формы применения физики в медицине. В этом разделе мы рассмотрим два самых значимых примера медицинской физики: методы получения изображений, которые используются для диагностики (радиодиагностика), и методы радиационной (или лучевой) терапии.

### Рентгеновские лучи

Вот уже более столетия рентгеновские лучи играют колоссальную роль в медицине. Их полезность стала очевидна в тот самый день, когда они были обнаружены. 8 ноября 1895 года немецкий физик Вильгельм Конрад Рентген (1845–1923) экспериментировал с электрическим разрядом в вакуумной трубке. Он обернул всю трубку черной бумагой и работал в затемненной комнате. Когда Рентген включил ток, вдруг засветился находящийся на некотором расстоянии от трубки люминесцентный экран. Какое-то исходящее из трубки излучение проходило через бумагу и воздух и вызывало свечение экрана. Рентген начал класть на пути излучения различные предметы, но они не блокировали излучение. Наконец, он поместил перед экраном руку и увидел теневое изображение костей. Так ученый одновременно открыл рентгеновские лучи и самый известный на сегодняшний день способ их применения.

Впервые рентгеновские лучи использовали для медицинских нужд уже 13 января 1896 года, когда два английских врача с их помощью нашли иглу в руке пациентки. Рентгеновские установки тут же стали широко применять в больницах для диагностики. Но выяснилось, что у этого нового метода есть небезопасные последствия. Хотя само просвечивание было безболезненным, длительное воздействие рентгеновских лучей вызывало глубокие ожоги и раны, которые появлялись спустя некоторое время. Очевидно, рентгеновские лучи не просто нагревали мягкие ткани, а производили еще какие-то невидимые изменения.

Так же как радиоволны, микроволны и свет, рентгеновские лучи являются формой электромагнитного излучения. Как мы уже отмечали, разные его виды отличаются друг от друга частотой и длиной волн: если у радиоволн низкие частоты и большие длины, то рентгеновские лучи характеризуются чрезвычайно высокими частотами и малыми длинами волн. А это означает, что разные виды излучения различаются величиной энергии фотонов. Из-за своей низкой частоты фотон радиоволны несет мало энергии. Среднечастотный фотон синего или ультрафиолетового света несет достаточно энергии, чтобы изменить одну связь в молекуле. А вот высокочастотный рентгеновский фотон несет столько энергии, что она может нарушить многие связи и вызвать распад молекулы.

В микроволновой печи микроволновые фотоны совместными усилиями разогревают и готовят еду. Энергия каждого фотона при этом не имеет значения, потому что они действуют не в одиночку. Но в лучевой терапии рентгеновские фотоны действуют независимо друг от друга. У каждого из них достаточно энергии, чтобы повредить любую молекулу, которая его поглотила. Вот почему рентгеновские ожоги не связаны с теплом и появляются через некоторое время после облучения — рентгеновские лучи вызывают повреждения молекул, от которых клетка постепенно погибает.

## Как получают рентгеновское излучение

Работа источников медицинского рентгеновского излучения основана на том, что быстро движущиеся электроны врезаются в тяжелые атомы. Эти столкновения создают рентгеновские лучи при помощи двух различных физических явлений: тормозного излучения и рентгеновской флуоресценции.

Тормозное излучение возникает при ускоренном движении заряженной частицы. Это не должно быть для нас новостью: мы знаем, что когда заряженная частица ускоряется в антенне, испускаются радиоволны. Но в радиоантенне электроны ускоряются медленно и испускают низкоэнергетические фотоны. В случае же тормозного излучения в рентгеновских источниках заряженная частица обычно ускоряется быстро и испускает фотон с очень высокой энергией. В рентгеновской трубке тормозное излучение возникает, когда быстро движущийся электрон огибает массивное ядро и ускоряется так резко, что испускает рентгеновский фотон (рис. 16.3.1). Этот фотон уносит значительную часть кинетической энергии электрона. Чем ближе электрон подходит к ядру, тем больше его ускорение и тем больше энергии отдает рентгеновскому фотону. Тем не менее вероятность того, что электрон пройдет на относительно большом расстоянии от ядра, выше, чем вероятность того, что электрон почти столкнется с ядром; поэтому при тормозном излучении чаще образуются рентгеновские фотоны с более низкой, чем с более высокой энергией.

Рентгеновская флуоресценция возникает, когда быстро движущийся электрон сталкивается с внутренним электроном тяжелого атома и выбивает его из атома (рис. 16.3.2). В результате столкновения атом превращается в положительный ион со свободной орбиталью недалеко от ядра. Затем электрон этого иона совершает излучательный переход с внешней орбитали на свободную внутреннюю орбиталь, испуская при этом рентгеновский фотон. Поскольку величина энергии этого фотона определяется орбитальной структурой иона, излучение получило название характеристического рентгеновского излучения.



Рис. 16.3.1. Когда быстро движущийся электрон огибает массивное ядро, его скорость быстро возрастает. Это внезапное ускорение создает тормозной рентгеновский фотон, который забирает некоторую часть энергии электрона.

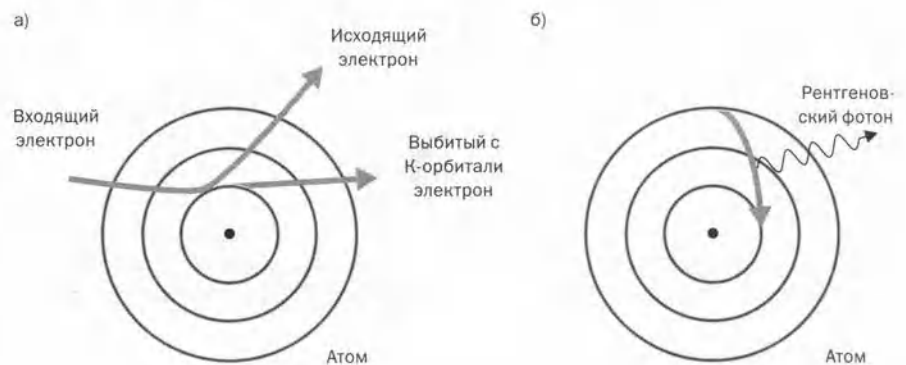
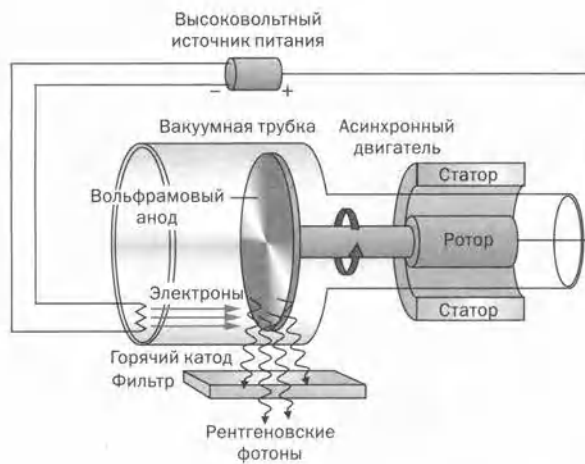


Рис. 16.3.2. (а) Когда быстро движущийся электрон сталкивается с электроном одной из внутренних орбиталей тяжелого атома, он может выбить этот электрон из атома. (б) Вскоре электрон с одной из внешних орбиталей атома занимает освободившуюся орбиталь, совершая излучательный переход, при котором испускается характеристическое рентгеновское излучение.



**Рис. 16.3.3.** В медицинском рентгеновском аппарате электроны, испускаемые раскаленной нитью, с ускорением устремляются к положительно заряженному металлическому диску. Сталкиваясь с атомами этого диска, они испускают рентгеновские лучи. Двигатель вращает диск, чтобы предохранить его от плавления. Фильтр поглощает бесполезное для медицинских целей низкоэнергетическое рентгеновское излучение.

Говоря об энергии рентгеновских фотонов, мы будем пользоваться теми же единицами измерения энергии, что и в разделе 14.2, — электронвольтами, или эВ. Энергия фотонов видимого света лежит в промежутке от 1,6 эВ (красный свет) до 3,0 эВ (фиолетовый свет). Поскольку энергия ультрафиолетовых фотонов солнечного света доходит до 7 эВ, они способны разрушать химические связи и вызывать солнечные ожоги. Однако энергия рентгеновских фотонов намного превышает энергию ультрафиолетовых.

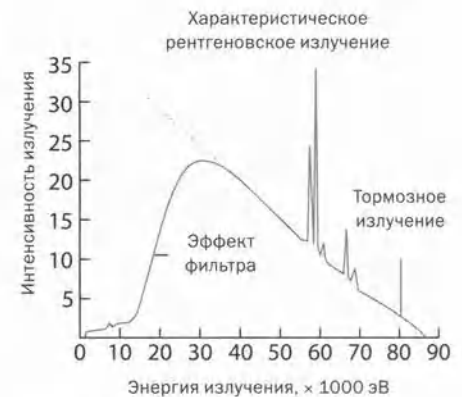
В обычной медицинской рентгеновской трубке электроны, испускаемые горячим катодом, с ускорением движутся в вакууме к положительно заряженному металлическому аноду (рис. 16.3.3). Анод представляет собой вольфрамовый или молибденовый диск, который во избежание плавления быстро вращается. Энергия электронов, когда они ударяются об анод, определяется разностью потенциалов на трубке. В медицинском рентгеновском аппарате эта разность, как правило, составляет примерно 87 000 В, соответственно, каждый электрон обладает энергией 87 000 эВ. С учетом того, что электрон отдает производимому им рентгеновскому фотону львиную долю своей энергии, выходящие из трубки фотоны могут нести энергию до 87 000 эВ. Неудивительно, что рентгеновские лучи могут повреждать живые клетки и ткани!

При столкновении с тяжелыми атомами электроны испускают как тормозное, так и характеристическое рентгеновское излучение (рис. 16.3.4). Характеристические лучи имеют специфические энергии, образующие пики на общем рентгеновском спектре. Тормозное рентгеновское излучение может иметь различные энергии, но наиболее интенсивное тормозное излучение характеризуется более низкими энергиями. Поскольку такие фотоны с более низкой энергией травмируют кожу, но при этом не играют роли ни в создании изображений, ни в лучевой терапии, в медицинских рентгеновских аппаратах для их поглощения предусмотрены специальные фильтры, например алюминиевые.

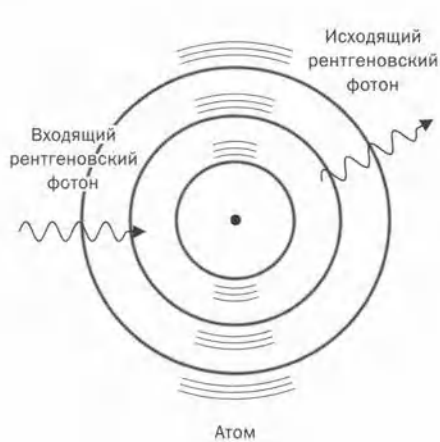
## Создание изображений с помощью рентгеновских лучей

Рентгеновские лучи применяются в двух важных областях медицины: в радиодиагностике и в лучевой терапии. Для создания изображений рентгеновские лучи пропускают через тело пациента, после чего они попадают на лист пленки или детектор рентгеновского излучения. Некоторые рентгеновские лучи проходят сквозь мягкие ткани, но большая их часть блокируется костями. Кости пациента формируют на пленке темные изображения. В лучевой терапии рентгеновские лучи также пропускают через тело пациента, но в этом случае важно их разрушительное воздействие на пораженные ткани.

Взаимодействие рентгеновских фотонов с тканями и костями включает четыре основных механизма: упругое рассеяние, фотоэффект, комптоновское рассеяние и образование электрон-позитронных пар. Упругое рассеяние уже знакомо нам, как объяснение того, почему небо голубое: атом действует как антенна для проходящей электромагнитной волны, поглощая и переизлучая ее, но не за-

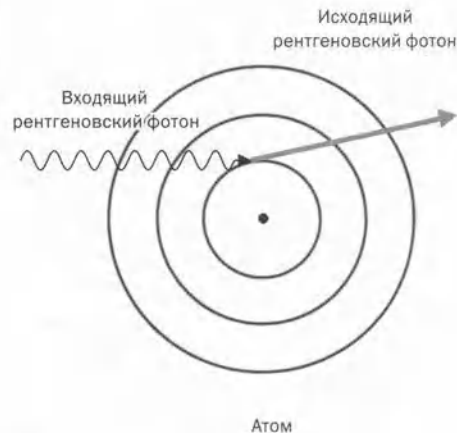


**Рис. 16.3.4.** Когда электроны, энергия которых доходит до 87 000 эВ, сталкиваются с металлическим вольфрамом, они испускают рентгеновские лучи по двум механизмам: тормозного излучения и рентгеновской флуоресценции. Тормозное рентгеновское излучение имеет широкий спектр энергий, поглощающий фильтр блокирует его низкоэнергетическую часть. Флуоресценция ответственна за характеристическое рентгеновское излучение (лучи, обладающие определенными значениями энергии, образуют пики).



**Рис. 16.3.5.** В процессах упругого рассеяния рентгеновского фотона весь атом действует как антенна. Проходящий фотон действует на все заряды в атоме, заряды поглощают его и заново испускают в другом направлении.

**Рис. 16.3.6.** Явление фотоэффекта заключается в том, что поглощенный фотон выбивает электрон из атома. Часть энергии фотона уходит на удаление электрона из атома, а остаток превращается в кинетическую энергию электрона.



бирая от нее никакой энергии (**рис. 16.3.5**). Поскольку этот процесс практически не влияет на атом, упругое рассеяние не играет роли в лучевой терапии. Тем не менее оно отрицательно влияет на качество рентгеновских изображений, создавая затуманенный фон: некоторые рентгеновские лучи, проходящие через пациента, отскакивают, как бильярдные шары, и в результате падают на пленку под нетипичными углами. Для устранения этих подпрыгивающих рентгеновских фотонов в рентгеновских аппаратах предусмотрены фильтры, которые блокируют рентгеновские лучи, падающие на пленку не со стороны источника рентгеновского излучения.

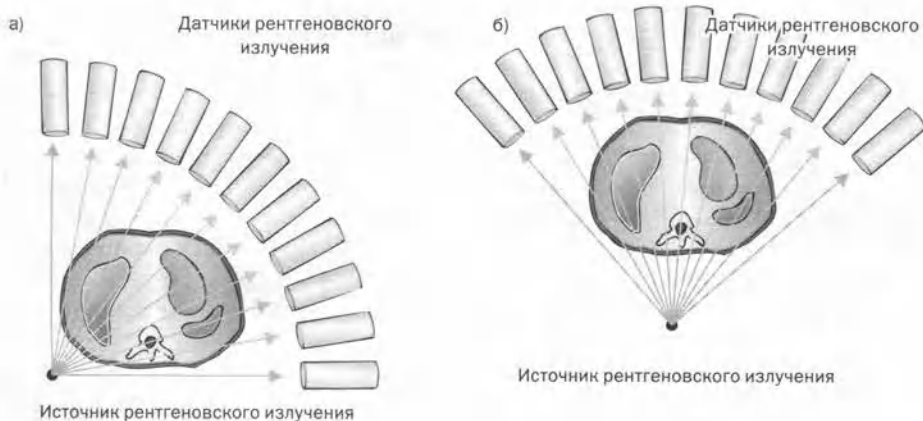
Именно фотоэффект делает возможным создание рентгеновских изображений. Это явление состоит в том, что проходящий сквозь материю фотон индуцирует в атоме излучательный переход: один из электронов атома поглощает фотон и покидает атом (**рис. 16.3.6**). Если бы атом использовал рентгеновский фотон для перехода электрона с одной орбитали на другую, этот фотон должен был бы обладать четко определенным запасом энергии. Но поскольку свободный электрон может иметь любое количество энергии, атом может поглотить всякий рентгеновский фотон, у которого достаточно энергии, чтобы выбить из него один из электронов. Часть энергии фотона используется для удаления электрона из атома, а остаток этот электрон уносит с собой в виде кинетической энергии.

Однако вероятность фотоэмиссии уменьшается с ростом энергии выбитого электрона. Это затрудняет поглощение рентгеновских фотонов небольшими атомами. Все электроны такого атома относительно слабо связаны с ядром, и рентгеновский фотон придавал бы выбитому электрону слишком много кинетической энергии. Вместо того чтобы испускать высокоэнергетические электроны, маленькие атомы обычно просто игнорируют проходящие рентгеновские фотоны.

В крупных атомах, напротив, некоторые электроны довольно прочно связаны с ядром. Большая часть энергии рентгеновского фотона расходуется на то, чтобы выбить такой электрон, а самому электрону достается уже относительно небольшое количество кинетической энергии. Поскольку вероятность процесса фотоэмиссии выше всего при образовании низкоэнергетических электронов, крупный атом, скорее всего, поглотит проходящий рентгеновский фотон. Таким образом, в то время как содержащиеся в тканях маленькие атомы (углерод, водород, кислород и азот) при рентгенодиагностике почти не поглощают рентгеновских лучей, находящиеся в костях крупные атомы (кальций и фосфор) активно их поглощают. Вот почему на рентгеновской пленке кости образуют четкие теневые изображения. Тени от тканей тоже видны, но гораздо хуже.

Если перелом кости можно диагностировать при помощи одного теневого изображения, в более сложных случаях этого может быть недостаточно. Чтобы составить полное представление о том, что происходит в организме пациента, рентгенолог должен изучить снимки, сделанные под разными углами и в разных проекциях. Но лучше всего применить компьютерную томографию (КТ). Компьютерный томограф автоматически сводит в общую картину, своего рода трехмерную "карту" организма пациента, данные десятков и сотен рентгеновских изображений, снятых под самыми разными углами и в разных проекциях.





**Рис. 16.3.7.** В компьютерной томографии суммарное изображение формируется при анализе теневых рентгеновских изображений, снятых под разными углами в разных проекциях. Источник рентгеновского излучения и блок электронных рентгеновских детекторов образуют кольцо, которое вращается вокруг пациента, пока тот медленно перемещается внутри аппарата.

Компьютерный томограф по очереди сканирует срезы организма пациента. Рентгеновские лучи просвечивают каждый узкий слой под всеми возможными углами, в том числе под теми двумя, что показаны на рис. 16.3.7. Томограф определяет расположение костей и мягких тканей на срезе, а затем перемещает пациента для работы над следующим участком.

## Лечение с помощью рентгеновского излучения

В лучевой терапии также используются рентгеновские лучи, но не те, что применяются в рентгенодиагностике. Если назвать те фотоны, которые служат для создания изображений, «диагностическими», то можно отметить, что ткани поглощают меньше таких фотонов, чем кости. Тем не менее большинство «диагностических» фотонов поглощаются, прежде чем им удастся пройти через плотные ткани. Например, лишь около 10% «диагностических» фотонов проходят через ногу пациента, даже когда не наталкиваются на кость. Этот показатель является в достаточной степени пригодным для создания изображения, но не для лучевой терапии, потому что большинство «диагностических» рентгеновских лучей будет поглощено до того, как сможет достичь глубоко расположенной опухоли. Вместо того чтобы убивать опухоль, интенсивное воздействие этих рентгеновских лучей будет разрушать подкожные ткани пациента.

Для воздействия на глубоко расположенные злокачественные ткани в лучевой терапии используются фотоны с очень высокой энергией. Когда энергия фотона приближается к миллиону электронвольт, фотоэлектрический эффект в тканях и костях наблюдается очень редко и у фотонов появляется гораздо больше шансов достичь опухоли. Фотоны так же убивают ткани и опухоли своей энергией, но делают это при помощи другого эффекта: комптоновского рассеяния.

Комптоновское рассеяние, или эффект Комптона, наблюдается, когда рентгеновский фотон сталкивается с единичным электроном так, что две частицы отскакивают друг от друга (рис. 16.3.8). Рентгеновский фотон сразу выбивает электрон из атома. Этот процесс отличается от фотоэффекта тем, что комптоновское рассеяние не затрагивает атом в целом и фотон рассеивается (отскакивает), а не поглощается. Физика этого явления напоминает столкновение двух бильярдных шаров, правда существенно осложненное теорией относительности. Однако сам факт существования такого эффекта является доказательством того, что фотон обладает и энергией, и импульсом и что обе эти величины сохраняются, когда частица света сталкивается с частицей материи.

В лучевой терапии комптоновское рассеяние играет решающую роль. Когда пациент подвергается воздействию фотонов с энергией 1 000 000 эВ, большая их часть проходит насквозь, но остальные подвергаются комптоновскому рассеянию и теряют часть своей энергии. Эта энергия убивает клетки и может быть использована для уничтожения опухоли. Если воздействовать на опухоль через тело пациента с разных сторон, можно свести к минимуму повреждение здоровой ткани вокруг опухоли, притом что сама опухоль получит смертельную дозу радиации\*.



**Рис. 16.3.8.** Комптоновское рассеяние состоит в том, что рентгеновский фотон сталкивается с отдельным электроном и они отскакивают друг от друга. Электрон выбивается из атома.

\* Из-за своей способности к быстрому росту опухоль более восприимчива к облучению. Повреждения здоровой ткани уменьшают и за счет того, что злокачественное образование подвергают облучению несколькими пересекающимися на нем пучками.

Но комптоновское рассеяние — не единственное явление, которое возникает, когда высокоэнергетические фотоны сталкиваются с веществом. Рентгеновские лучи с энергией немногим выше 1 022 000 эВ при прохождении через атом вызывают необыкновенный эффект: они могут вызвать образование электронно-позитронных пар. Позитрон — это античастица электрона, то есть его эквивалент из антивещества. Наша Вселенная симметрична во многих отношениях, и одно из проявлений ее почти идеальной симметрии — существование антивещества. Почти каждая частица в природе имеет античастицу с такой же массой, но противоположными свойствами. Позитрон, или антиэлектрон, имеет такую же массу, как электрон, но несет положительный заряд. Точно так же существуют антипротоны и антинейтроны.

Антивещество не встречается на Земле, но может создаваться в высокоэнергетических столкновениях. Когда высокоэнергетический фотон сталкивается с электрическим полем атома, фотон может превратиться в электрон и позитрон. В предыдущем разделе мы обсуждали, как вещество преобразуется в энергию; образование электронно-позитронной пары является примером обратного перехода: энергия становится материей. Для образования электрона или позитрона требуется около 511 000 эВ энергии, так что для создания пары фотон должен иметь по крайней мере 1 022 000 эВ. Любой излишек энергии сверх этого превращается в кинетическую энергию двух частиц.

В организме пациента позитрон существует недолго. Очень скоро он сталкивается с электроном, и они взаимно уничтожаются — аннигилируют. Электрон и позитрон исчезают, их масса преобразуется в энергию. Они превращаются в фотон с общей энергией по меньшей мере 1 022 000 эВ. Так энергия на короткое время становится веществом, а потом вновь превращается в энергию. Этот необычный процесс, который становится заметным при энергиях фотонов выше 10 миллионов эВ, применяется в лучевой терапии высоких энергий. Как и следовало ожидать при таких энергиях, он помогает уничтожать опухоли.

## Гамма-излучение

Получить фотоны очень высоких энергий гораздо сложнее, чем те, которые используются для создания рентгеновских изображений. В принципе соответствующий источник питания может создать огромную разность потенциалов на концах рентгеновской трубки, чтобы высокоэнергетические электроны могли сталкиваться с атомами металла и производить фотоны с чрезвычайно высокими энергиями. Но работать с напряжением в миллион вольт и сложно, и опасно, поэтому обычно используются другие методы.

Один из самых простых способов получения фотонов очень высоких энергий — распад радиоактивных изотопов. В лучевой терапии чаще всего применяется изотоп кобальт-60 ( $^{60}\text{Co}$ ). У него в ядре слишком много нейтронов и, как многие нейтронно-избыточные ядра,  $^{60}\text{Co}$  подвергается бета-распаду — один из его нейтронов распадается на протон, электрон и нейтрино (точнее, антинейтрино). После этого изотоп  $^{60}\text{Co}$  претерпевает еще целый ряд преобразований, в результате которых выделяются два фотона высокой энергии: 1 170 000 эВ и 1 330 000 эВ. Эти фотоны хорошо проникают в ткани и весьма эффективно уничтожают опухоли.

Несмотря на сложность и многостадийность процесса образования этих двух высокоэнергетических фотонов, явление бета-распада показывает, что протоны, электроны и нейтроны не являются неизменными и что в нашей Вселенной есть и другие субатомные частицы. Нейтроны вне ядер или входящие в состав избыточно-нейтронных ядер являются радиоактивными и подвергаются бета-распаду. В процессе бета-распада ядра  $^{60}\text{Co}$  происходит испускание отрицательно заряженного электрона и нейтрального нейтрино, но вновь образовавшийся протон остается в ядре. Таким образом, ядро превращается в изотоп никель-60 ( $^{60}\text{Ni}$ ).

Нейтрино представляет собой не имеющую заряда субатомную частицу чрезвычайно малой массы. В обычных атомах нейтрино не обнаружен. Несмотря на важную роль, которую нейтрино играет в ядерной физике и физике элементарных частиц, его трудно наблюдать: частица движется почти со скоростью света

и практически никогда ни с чем не сталкивается. Будучи незаряженной, нейтрино не участвует в электромагнитных взаимодействиях и, в отличие от электрически нейтрального нейтрона, не испытывает влияния ядерных сил. На нейтрино действует только гравитация и слабое взаимодействие — последний из четырех типов фундаментальных взаимодействий, известных в нашей Вселенной. (Остальные три типа фундаментальных взаимодействий — гравитационное, электромагнитное и сильное. Последнее — более полная версия ядерных сил, которые мы обсуждали в предыдущем разделе.) Поскольку слабое взаимодействие, как это следует из названия, является незначительным и наблюдается только между очень близко расположенными частицами, оно достаточно редко проявляется. Бета-распад — один из немногих случаев, когда слабое взаимодействие играет важную роль.

Не имея почти никакой возможности притягивать или отталкивать другие частицы, нейтрино способно насквозь пройти через всю планету. Иногда нейтрино можно обнаружить, но для этого нужны огромные детекторы. Вот почему физики вначале доказали излучение нейтрино при распаде нейтронов путем измерения энергии и импульса до и после распада. Суммарные значения энергии и импульса протона и электрона, образующихся в результате распада, отличаются от исходных значений энергии и импульса нейтрона. Что-то должно уносить недостающую энергию и импульс, и это "что-то" и есть нейтрино.

На том, что  $^{60}\text{Co}$  превращается в  $^{60}\text{Ni}$ , распад еще не заканчивается. Образовавшееся ядро  $^{60}\text{Ni}$  все еще обладает избытком энергии. Ядра — столь же сложные квантовые физические системы, как и атомы, и они тоже могут переходить в возбужденное состояние. Ядро  $^{60}\text{Ni}$  находится в возбужденном состоянии, и ему нужно совершить еще два излучательных перехода, прежде чем оно достигнет основного состояния. В этих излучательных переходах испускаются фотоны очень высокой энергии или гамма-лучи. Для ядра  $^{60}\text{Ni}$  характеристическими являются два гамма-фотона, с энергиями соответственно 1170 000 и 1330 000 эВ. Благодаря этому гамма-излучению кобальт-60 можно использовать для лучевой терапии.

## Ускорители частиц

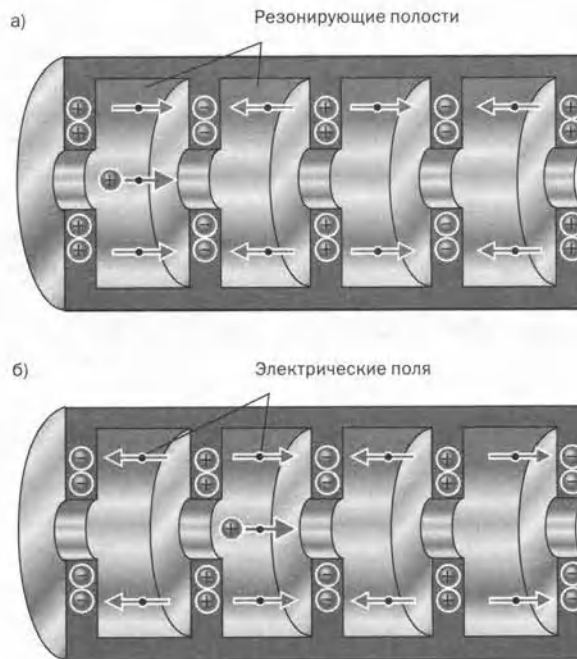
В медицине используют не только электромагнитное излучение, но и такие высокоэнергетические частицы, как электроны и протоны. Эти быстро движущиеся частицы, как крошечные бильярдные шарик, сталкиваются с атомами внутри опухолей и разбивают их. Как и в других случаях, повреждение атомов и молекул, как правило, приводит к гибели клетки и распаду опухоли.

Однако получить субатомные частицы высоких энергий не так просто. При помощи высоковольтных источников энергии можно разогнать электрон или протон до 500 000 эВ, но этого недостаточно. Когда заряженная частица входит в ткань, под действием электрических сил она легко отклоняется в сторону. Чтобы частица двигалась строго в нужном направлении, напрямик к опухоли, она должна иметь огромную энергию. Чтобы передать каждой заряженной частице миллионы или даже миллиарды электронвольт, необходимых для лучевой терапии, нужен ускоритель частиц.

Ускорители частиц используют металлические резонаторы, которые ведут себя как колебательные контуры и антенны, которые мы рассматривали в разделе 13.1. Почти любая металлическая структура может действовать одновременно и как конденсатор, и как катушка индуктивности, поэтому, следовательно, обладает естественным резонансом в отношении "плещущегося" заряда. В резонаторных полостях ускорителя частиц "плещущийся" заряд создает изменяющиеся во времени электрические поля гигантской силы. Эти электрические поля ускоряют движение заряженных частиц в пространстве, пока те не достигают невероятных энергий.

Один из основных типов ускорителя частиц — линейный ускоритель. В этом устройстве электрические поля в серии резонаторов заставляют заряженную частицу двигаться по прямой (рис. 16.3.9). В каждой полости ритмично "плещется" свой электрический заряд. Когда небольшой пучок заряженных частиц через отверстие входит в первый резонатор, его внезапно толкает вперед сильное элек-

**Рис. 16.3.9.** В линейном ускорителе периодически меняющее направление электрическое поле ускоряет заряженные частицы. (а) Когда движущийся положительный заряд проходит первую из ряда резонирующих полостей, электрическое поле этой полости толкает его вперед. (б) К тому моменту, когда движущийся заряд входит во вторую полость, направление поля меняется на противоположное с тем, чтобы еще раз толкнуть заряд дальше через ускоритель.



трическое поле этого резонатора (рис. 16.3.9, а). Пучок приобретает ускорение и выходит из первого резонатора, увеличив запас своей кинетической энергии: ускоряющее электрическое поле полости совершило над ним работу.

Если бы поля в резонаторах были постоянными, электрическое поле второго резонатора затормозило бы пучок. На рис. 16.3.9, а видно, что электрическое поле второго резонатора направлено противоположно движению пучка. Но к тому моменту, когда пучок достигает второго резонатора, "плещущийся" в нем заряд разворачивается, а вместе с ним меняет направление и электрическое поле (рис. 16.3.9, б). Пучок вновь ускоряется и выходит из второго резонатора с еще большей кинетической энергией.

Каждый ускоряющий резонатор добавляет пучку энергию, поэтому при прохождении длинного ряда резонаторов каждая из заряженных частиц пучка может получить миллионы или даже миллиарды электронвольт. Энергия поступает от электрического генератора высокой частоты, который заставляет заряд "плескаться" в резонаторах ускорителя. Остается лишь направить заряженные частицы в первую полость при помощи устройства, напоминающего телевизионный кинескоп, и эти заряженные частицы будут вылетать из последнего резонатора, уже обладая огромной энергией.

Однако у этого метода есть и некоторые технологические сложности. Самая главная из них — синхронизация: чтобы пучок продолжал двигаться с ускорением, каждый резонатор должен развернуть свое электрическое поле точно в нужный момент. Для упрощения управления все резонаторы имеют одинаковую резонансную частоту и одновременно разворачивают электрические поля. Поскольку пучок проходит каждый из них за одинаковый промежуток времени, но при этом всякий раз ускоряется, каждый следующий резонатор должен быть протяженнее предыдущего.

Однако когда скорость пучка приближается к скорости света, происходит нечто странное. Энергия пучка при прохождении через резонаторы продолжает расти, в то время как скорость уже почти не увеличивается. Это явление объясняется специальной теорией относительности — законами, описывающими движение при скоростях, близких к скорости света. Как мы видели в разделе 4.2, простое соотношение между кинетической энергией и скоростью (уравнение 2.2.1) не распространяется на объекты, движущиеся почти со скоростью света; вместо этого мы должны пользоваться уравнением 4.2.4. Еще одно следствие теории относительности заключается в том, что пучок может только приблизиться к скорости света, но не может ее достичь. Хотя кинетическая энергия каждой заряженной частицы может стать необычайно большой, ее скорость ограничена скоростью света.

Поскольку скорость пучка после прохождения первых нескольких резонаторов линейного ускорителя перестает заметно расти, размер остальных полостей может быть одинаковым. Чтобы учитывать увеличение скорости, нужно специально рассчитывать длину только нескольких первых резонаторов. Заряженные частицы вылетают из ускорителя на скоростях, близких к скорости света. Они проходят через узкое металлическое окошко, которое не дает воздуху проникнуть в ускоритель, и входят в тело пациента. Энергия частиц настолько велика, что они могут проникнуть глубоко внутрь тканей, прежде чем остановятся.

## Магнитно-резонансная томография

В то время как рентгеновские лучи превосходно справляются с созданием изображений костей, со снимками тканей дело обстоит гораздо хуже. Для исследования ткани гораздо больше подходит магнитно-резонансная томография, или МРТ. Этот метод основан на определении положения атомов водорода путем взаимодействия с магнитными моментами их ядер. Поскольку атомы водорода входят в состав воды и органических молекул, исследование атомов водорода предоставляет прекрасную возможность изучения биологических тканей.

Ядром обычного атома водорода,  $^1\text{H}$ , является протон. У протонов, как и у электронов, есть два возможных внутренних квантовых состояния: спин-вверх и спин-вниз. Спин-вверх и спин-вниз протоны имеют равный, но противоположно направленный угловой момент. Коль скоро в системе присутствует и электрический заряд, и вращение, ничего удивительного, что проявляется и магнетизм; в конце концов, электрические токи тоже обладают магнитными свойствами. Конечно же, протоны имеют магнитные диполи — равные друг другу по величине северный и южный полюсы, расположенные на расстоянии друг от друга. Спин-вверх протон ведет себя так, будто северный полюс у него сверху, а спин-вниз — наоборот, внизу.

Когда протон попадает в магнитное поле, он пытается сориентировать свой магнитный диполь в соответствии с этим полем. Таким образом он минимизирует свою магнитную потенциальную энергию. При температуре абсолютного нуля протонам удастся идеально выровнять диполь с магнитным полем, но при комнатной температуре это получается гораздо хуже. Тепловая энергия возбуждает протоны, так что даже в сильном направленном вверх магнитном поле спин-вверх протонов лишь немного больше, чем их спин-вниз собратьев.

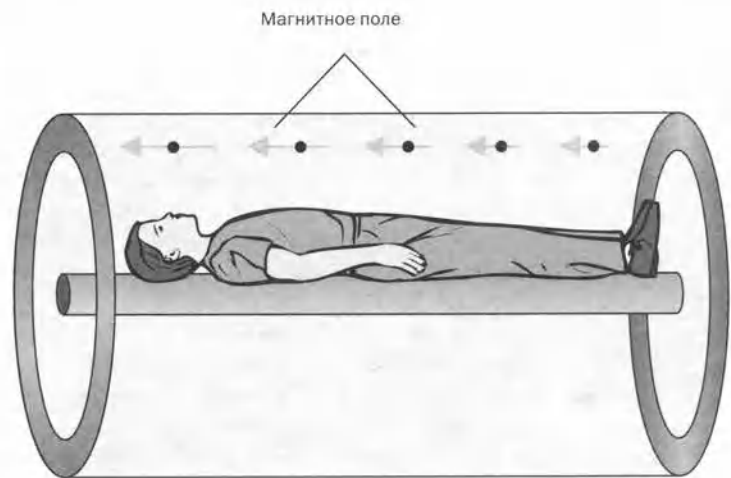
В этом направленном вверх магнитном поле каждый протон имеет два возможных квантовых состояния: ориентация в направлении поля (спин-вверх) или против поля (спин-вниз). Поскольку ориентация в направлении поля снижает магнитную потенциальную энергию протона, основное из этих двух состояний — то, где энергия меньше, то есть в данном примере спин-вверх. Противоположная ориентация соответствует возбужденному состоянию.

Имея два возможных состояния, основное и возбужденное, протон в магнитном поле может проявлять многие характерные для атомов свойства, которые мы рассматривали в разделе 14.2. Самое главное, что протон может совершать излучательные переходы между двумя состояниями. Протон, находящийся в основном состоянии, может поглотить фотон, совершая излучательный переход в возбужденное состояние; а находящийся в возбужденном состоянии протон может испустить фотон при переходе в основное состояние.

Из раздела 14.2 мы знаем, что данный атом может поглощать или излучать только некоторые фотоны — фотоны, несущие определенное количество энергии, необходимое для перевода атома из одного квантового состояния в другое. Скажем, неоновая реклама светится красным, потому что энергетические состояния атома неона отличаются на величину, равную энергии красного фотона. Аналогичным образом и протон в магнитном поле может поглощать или излучать только определенные фотоны — фотоны, несущие ровно столько энергии, сколько нужно, чтобы перевести протон из одного квантового состояния в другое.

Тем не менее, в отличие от атома неона, который всегда взаимодействует с красными фотонами, протон в магнитном поле взаимодействует с фотонами, которые меняют “цвет” в зависимости от силы магнитного поля. Причина в том, что разность энергий, соответствующих двум состояниям протона, пропорцио-

Рис. 16.3.10. В магнитно-резонансном томографе пациента помещают в сильное магнитное поле. Благодаря пространственным вариациям поля протоны, находящиеся в разных участках организма, испытывают воздействие отличающихся магнитных полей и поглощают радиоволновые фотоны различных параметров.



нальна интенсивности магнитного поля, в котором он находится. Следовательно, энергия фотона, необходимая, чтобы вызвать излучательный переход протона из одного состояния в другое, также пропорциональна магнитному полю. Когда поле меняется, меняется и энергия фотона.

Когда в магнитно-резонансном томографе пациент попадает в сильное магнитное поле (рис. 16.3.10), протоны в его теле реагируют на поле так, что образуется небольшой избыток ориентированных вдоль поля протонов. Для исследования имеют значение только эти избыточные протоны, потому что действие остальных протонов, равное количество которых ориентировано вдоль и против поля, полностью уравновешивает друг друга. Избыточные ориентированные вдоль поля протоны находятся в основном состоянии, и именно их регистрирует томограф.

Аппарат МРТ взаимодействует с этими находящимися в основном состоянии протонами, используя радиоволновые фотоны с энергиями, равными разности энергий между основным и возбужденным состоянием протона. Протоны могут поглощать и потом, соответственно, испускать эти фотоны, а кроме того, могут проявлять самые разнообразные интересные и полезные квантовые интерференционные эффекты.

Если бы на протоны в теле пациента действовало одинаковое магнитное поле, все они поглощали и испускали бы одинаковые радиоволновые фотоны. Но в том-то и дело, что поле не совсем одно и то же. Томограф вносит в магнитное поле небольшие пространственные изменения. Поскольку магнитное поле, действующее на разные протоны, различается, только некоторые из них могут взаимодействовать с радиоволновыми фотонами определенной энергии. Именно благодаря селективному взаимодействию томограф обнаруживает протоны внутри тела пациента.

В самом упрощенном виде аппарат МРТ работает следующим образом: пациента помещают в пространственно-переменное магнитное поле. Затем его облучают различными радиоволнами, чтобы найти радиоволновые фотоны, которые будут взаимодействовать с протонами. Так как с определенным фотоном может взаимодействовать только протон, на который действует магнитное поле строго определенных параметров, аппарат может определить местонахождение каждого протона по фотонам, с которыми он взаимодействует. Изменяя пространственные характеристики магнитного поля и регулируя энергии радиоволновых фотонов, томограф постепенно находит протоны в теле пациента. Он строит подробную трехмерную карту расположения атомов водорода. После компьютерной обработки можно получить изображения поперечного сечения исследуемого участка под любыми углами и в любой проекции.

## ГЛАВА 17

# ВЕЩИ И ВЕЩЕСТВА

---

**М**ежду природными ресурсами — скажем, водой и воздухом — и тем, что создает из природного сырья человек, например лампочками и велосипедами, лежит целый мир модифицированных и синтетических материалов. Изучение и разработка этих базовых элементов любого производственного процесса оказывают огромное влияние на нашу повседневную жизнь. Этим занимается специальная область науки — материаловедение.

Несмотря на оптимистическое название книги, мы не можем рассмотреть все проявления физических законов в нашей жизни, не говоря уже о том, как физика взаимодействует с другими науками. Однако границы между научными дисциплинами размыты, и я нередко нарушаю их в своей работе. Я не претендую на звание эксперта в других сферах, но доверяю специалистам, и мне нравится находить в их исследованиях элементы физики. Кроме того, во время подобных “вылазок” я всегда узнаю много нового.

В материаловедении используются различные физические законы, и многие специалисты в этой области начинали свой профессиональный путь с изучения физики. Экспериментаторам нужны для опытов тонкие инструменты, а ученые-материаловеды готовы предоставить им эти инструменты. В хозяйственном магазине мы выбираем ножички и ножницы, которые не тупятся и не ломаются, клей, который склеивает все на свете, стекло и пластики, которые не бьются и не царапаются, веревки, которые способны выдержать любой вес.

В этой главе, как и в предыдущих, мы будем искать в физике ответы на вопросы “как” и “почему”. Но на этот раз я расскажу не только об устройстве различных вещей, но и о специфических свойствах материалов, из которых эти вещи сделаны. В начальной школе нас учили различать твердые, жидкие и газообразные вещества, а также простые смеси и растворы. Если ваше представление о природе веществ с тех пор не изменилось, добавлю еще один термин — пластмассы. К какой категории относится виниловая обивка для мебели? А жевательная резинка? А желе? Очевидно, мир веществ и материалов гораздо богаче, чем кажется на первый взгляд.

### 584 17.1 Ножи и сталь

*Почему для хорошего ножа нужна хорошая сталь.*

### 593 17.2 Окна и стекло

*Как получается стекло и как делают стеклянные окна.*

### 606 17.3 Пластмассы

*Чем объясняются удивительные свойства пластиков.*



## 17.1 Ножи и сталь

От тупого ножа на кухне никакой пользы — разломать на куски помидор или батон можно и руками. Однако не так-то просто наточить нож, поскольку лезвия бывают разные. Немногие ножи долго остаются острыми, но бывают просто чудесные, чуть ли не вечные ножи. И те и другие сделаны из стали, однако их лезвия явно чем-то отличаются друг от друга.

Как в те далекие времена, когда оружейное ремесло приравнивалось к искусству, так и в нашу эру науки и высоких технологий именно ножи служат самым трудным “тестовым заданием” для сталеваров. Лезвие ножа должно быть прочным и гибким, а его режущий край — твердым, но не хрупким. Поэтому нужно тщательно контролировать состав сплава и процесс производства стали. Чтобы правильно выбрать нож, надо знать свойства стали.

### Напряжение и деформация, изгиб и излом

Нож — это простейший инструмент, с помощью которого мы режем предметы на части. Он представляет собой клин и благодаря выигрышу в силе превращает малые направленные вперед силы в большие разделяющие силы. Когда вы надавливаете ножом на морковь, чтобы разрезать ее (рис. 17.1.1), его режущий край входит в морковь, в то время как обе скошенные грани лезвия действуют на половинки овоща с огромными горизонтальными силами. Одна половинка перемещается влево, а другая — вправо, и морковь аккуратно разделяется надвое.

Рис. 17.1.1. Когда вы давите на нож, чтобы разрезать морковь, разделочная доска толкает ее вверх. В итоге действующие на морковь вертикальные силы, включая ее собственный вес, полностью компенсируют друг друга. Но клиновидная поверхность лезвия создает большие горизонтальные силы, которые действуют на обе половинки овоща, — вот эти силы и делают морковь на две части.

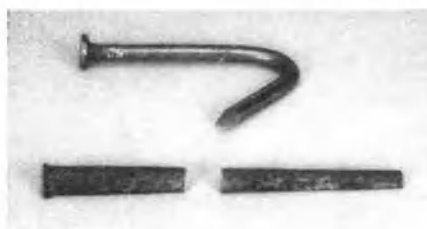


Рис. 17.1.2. Мягкая сталь с низким содержанием углерода легко гнется, в то время как твердая высокоуглеродистая скорее сломается, чем согнется.

Но если механика этого процесса проста, то микроскопическая структура материала, из которого сделан нож, — вовсе нет. Нож разрезает морковь благодаря особым характеристикам своего лезвия. А лезвия ножей почти всегда сделаны из стали, так что секрет работы ножа на самом деле кроется в свойствах этого металла.

Сталь — это не какое-то одно вещество, а целый класс металлов, основным компонентом которых является железо. Эти металлы различаются по химическому составу и способу производства. Марок и сортов стали так много, что для них трудно подобрать общее определение. Но все они представляют собой сплавы железа с другими элементами, содержащие не более 2,06% углерода по весу. Сплав с более высоким содержанием углерода называют чугуном.

Сталь принципиально отличается от чугуна содержанием углерода, поскольку именно это влияет на твердость, хрупкость и прочие свойства металла (рис. 17.1.2).



Твердость — это мера сопротивления материала проникновению в него инструмента, деформации, истиранию и износу. Хрупкость говорит о склонности материала к растрескиванию при деформации. Лезвие хорошего ножа должно быть твердым, но не хрупким; оно может слегка изогнуться, когда вы шинкуете морковь, но не должно сломаться, даже если открыть им консервную банку.

Контроль твердости, хрупкости и других свойств стали — сложная задача, которую приходится решать на всех стадиях производства. Иногда один и тот же предмет может обладать разными свойствами — так, режущий край качественного ножа тверже остальной части лезвия. Чтобы понять, как этого добиваются, давайте сначала посмотрим, как сталь реагирует на приложенные извне усилия и как зависят ее свойства от микроскопической структуры. Все это касается не только стали, но и многих других материалов.

Если вы мягко надавите на твердое тело, оно деформируется пропорционально приложенному усилию. Эта зависимость описывается законом Гука, который мы уже изучали на примере с пружинами в разделе 3.1. Допустим, тело — это лежащий на полу стальной брусок; если вы на него наступите, он деформируется в очень незначительной степени пропорционально вашему весу. Выяснив, насколько ваш вес деформирует брусок, вы сможете судить о свойствах стали, из которой он отлит.

Но деформация зависит и от размеров бруска. Чем шире его поверхность, тем больше распределен ваш вес и тем меньше искажается форма бруска. Поскольку нас интересует сталь, а не брусок, мы разделим ваш вес на площадь его поверхности и получим напряжение, возникающее в материале (рис. 17.1.3). Напряжение — это величина силы, которая действует на единицу площади поверхности, мера сжатия стали.

Однако на изменении формы бруска сказывается и его высота. Каждый сантиметр металла слегка сжимается, поэтому высокий брусок сжимается сильнее, чем низкий. Опять-таки нам интереснее, как ведет себя сталь, а не брусок, и, разделив изменение высоты бруска на его первоначальную высоту, мы получим относительное удлинение (деформацию) стали (рис. 17.1.3).

Зависимость между возникающим в образце стали напряжением и вызванной этим напряжением деформацией описывается законом Гука:

$$\text{деформация} = \frac{\text{напряжение}}{\text{модуль Юнга}} \quad (17.1.1),$$

где модуль Юнга показывает, насколько трудно сжать сталь. Деформация (относительное удлинение) — просто число, безразмерная величина, а физический смысл напряжения и модуля Юнга — это давление, и они измеряются в паскалях (Па).

Модуль Юнга характеризует межатомные взаимодействия, которые обеспечивают целостность материала. В твердом веществе между атомами действуют силы притяжения и отталкивания, и при нормальном расположении атомов эти силы уравновешены. Если попытаться сблизить или раздвинуть атомы, равновесие нарушится, внутренние силы будут противодействовать внешнему усилию. Чем прочнее связаны меж собой атомы, тем выше модуль Юнга и тем меньше деформируется материал при сжатии.

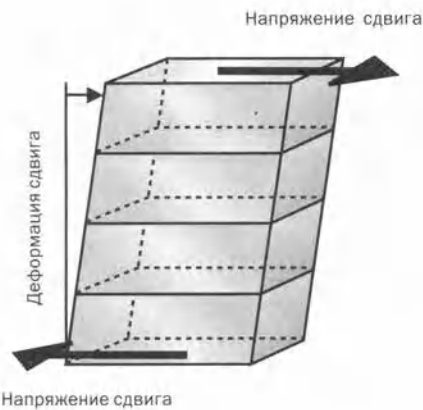
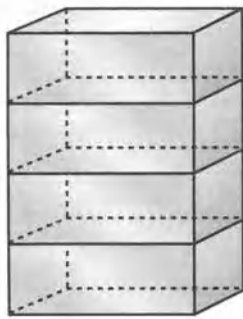
В стали межатомные силы — это преимущественно силы взаимодействия атомов железа друг с другом, поэтому можно считать, что модуль Юнга стали примерно равен модулю Юнга железа — 195 ГПа (195 гигапаскалей, или 195 000 000 000 Па). При такой огромной его величине сжать сталь чрезвычайно трудно. Если на кубик стали со стороной 1 см наедет городской автобус, он станет ниже менее чем на микрон. Такой же свинцовый кубик сожмется в 14 раз сильнее, а кубик вольфрама — вдвое меньше.

Хотя уравнение 17.1.1 записано для случая сжатия, оно справедливо и в тех ситуациях, когда сталь подвергается слабому растяжению. В данном случае напряжение — растягивающее, а не сжимающее — отрицательно, и вызванная им деформация (растяжение, а не сжатие) также отрицательна. Сжимая или растягивая образец стали, вы испытываете на прочность межатомные взаимодействия, а величина модуля Юнга не меняется. Как правило, модуль Юнга измеряют для растягивающего напряжения, а не для сжатия, потому что тонкий образец материала при сжатии погнется, а при растяжении может остаться ровным и гладким.

Но стальной брусок может подвергаться не только напряжению сжатия и растяжения. Если толкать его нижний край влево, а верхний — вправо, возни-



Рис. 17.1.3. Под воздействием направленного внутрь напряжения сталь сжимается. Напряжение равно силе, направленной внутрь и приложенной к единице площади поверхности. Напряжение вызывает деформацию стали. Деформация — это относительное изменение длины образца, то есть изменение его длины, деленное на первоначальную длину.



**Рис. 17.1.4.** Под воздействием напряжения сдвига материал изгибается. Напряжение сдвига, равное приложенной к единице площади поверхности боковой силе, вызывает деформацию сдвига. Деформация сдвига определяется углом изгиба.

кает напряжение сдвига (**рис. 17.1.4**). Такое напряжение заставляет брусок изогнуться и является причиной деформации сдвига в металле. Деформация сдвига определяется по углу изгиба, вызванного напряжением сдвига. При относительно небольших силах деформация сдвига пропорциональна напряжению сдвига:

$$\text{деформация сдвига} = \frac{\text{напряжение сдвига}}{\text{модуль упругости при сдвиге}} \quad (17.1.2),$$

где модуль упругости при сдвиге (жесткость на сдвиг) показывает, насколько трудно изогнуть металл.

Напряжение и деформация служат критериями при определении сорта стали. Важнейший показатель качества ножа — его реакция на напряжение. Модуль Юнга и жесткость на сдвиг одинаковы для всех сортов стали, поэтому при слабых напряжениях их различить трудно. Существенная разница становится заметна только при больших напряжениях, когда уравнения 17.1.1 и 17.1.2 уже неприменимы. Сталь начинает гнуться и ломаться, и мы понимаем, чем хороший нож отличается от плохого.

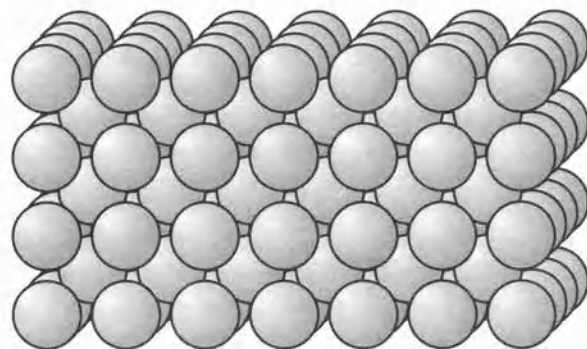
## Пластическая деформация и кристаллические вещества

Упругие свойства пружины ограничиваются известными пределами, за которыми закон Гука не работает и наступает необратимая деформация. Умеренное воздействие вызывает упругую деформацию пружины, после чего она способна распрямиться, в то время как большая сила деформирует ее навсегда. То же самое происходит с образцом стали. Пока напряжение невелико, сталь подвергается упругим деформациям — в соответствии с равенствами 17.1.1 и 17.1.2 она теряет форму, пока действует напряжение, а затем возвращается в исходное состояние. Но если напряжение очень большое, сталь подвергается пластической деформации — ее атомы меняют свое положение, и образец деформируется необратимо.

Сорта стали сильно отличаются друг от друга по способности к пластической деформации. Сначала все они реагируют на небольшие напряжения упруго, но постепенно, по мере усиления напряжения, наступает пластическая деформация. Пороговое напряжение, которое сталь выдерживает до пластической деформации, называется пределом текучести — это важный показатель способности стали сопротивляться нагрузкам. Мягкая сталь легко деформируется даже при умеренных напряжениях, а прочная отвечает упругой деформацией на любые, чуть ли не экстремальные, напряжения. Режущий край ножа должен выдерживать значительные нагрузки, не подвергаясь пластической деформации, — тогда он не затупится.

Чтобы выяснить, как в лезвии ножа развивается пластическая деформация, надо изучить микроскопическую структуру стали. Но поскольку у стали довольно сложная структура, начнем с чистого железа. Будучи металлом, железо является твердым кристаллическим веществом. Пусть оно не имеет красивой природной огранки, как некоторые минералы, но его атомы расположены в строго установленном порядке. При комнатной температуре образуются кристаллы феррита. Феррит — это ферромагнитный материал, в котором атомы железа образуют объемно-центрическую кубическую решетку (**рис. 17.1.5**).

Рассмотрев решетку повнимательнее, вы увидите гладкие поверхности между слоями атомов. При достаточно большом напряжении сдвига в решетке возникает явление, которое называется скольжением — слои атомов скользят друг



**Рис. 17.1.5.** Атомы железа в феррите образуют объемно-центрическую кубическую решетку. Такая решетка строится из кубиков, каждый из которых состоит из 8 атомов, формирующих грани (2 × 2 × 2), и одного атома в центре кубика.

по другу. Скольжение — наиболее распространенный механизм пластической деформации. Сжимая, растягивая и изгибая образец чистого железа до такой степени, что превышает предел текучести, вы, скорее всего, вызовете скольжение. В процессе относительного скольжения атомных слоев кристалл меняет форму, словно карточная колода, верхнюю карту которой сдвинули. Атомы “забывают”, как они были расположены до этого, и, когда вы перестанете давить на образец железа, он не сможет восстановить первоначальную форму.

В железе скольжение возникает особенно легко из-за несогласованности в ориентации связей, которые удерживают его частицы вместе. Металлическая связь образуется в результате того, что бесчисленное множество атомов владеет общими электронами. Такое обобществление приводит к уменьшению как кинетической, так и потенциальной энергии электронов и не дает атомам “привязаться” друг к другу. Относительное расположение атомов не влияет на металлическую связь, поэтому кристаллическая решетка железа подвержена скольжению.

Однако на то, где и когда произойдет скольжение, влияют другие факторы. Они связаны с несовершенством кристаллической решетки металла. Природа не упускает шанса нарушить порядок, и даже в самых чистых кристаллах встречаются случайные пороки. В обычном кристалле железа полно дефектов. Один из самых распространенных — дислокация, внезапный обрыв слоя атомов посередине структуры (рис. 17.1.6).

В идеальном кристалле скользит сразу целый атомный слой. Но дислокация нарушает однородность решетки и облегчает поэтапное, ряд за рядом, скольжение. В кристаллах с дислокацией предел текучести вдоль плоскости скольжения — слоя атомов, перпендикулярного краю дефектного участка, — нетипично низок.

В то время как дислокация облегчает скольжение, тем самым делая железо менее прочным, другие дефекты препятствуют скольжению, увеличивая прочность железа. Один из таких дефектов — поликристаллическая структура; в норме железо не является монокристаллом — оно состоит из множества отдельных кристаллитов, соединенных друг с другом под разными углами. Отдельный кристаллит называется зерном, а слой атомов, связывающий зерна, — границей зерна.

Зерна и границы зерен способствуют повышению прочности железа. Внутри зерна скольжение возможно только между некоторыми атомными слоями в определенных направлениях. Ориентация зерен произвольна, поэтому все атомные слои не могут скользить в одну и ту же сторону. Для того чтобы образец железа приобрел текучесть в том или ином направлении, скольжение в зернах должно быть скоординировано, что возможно лишь при очень больших механических напряжениях. Поэтому предел текучести железа с мелкозернистой структурой выше, чем при наличии малого количества крупных зерен.

Величина и форма зерен зависят от способа производства и обработки железа. Поскольку атомы граничной плоскости, которые связывают зерна, не входят в структуру последних, их потенциальная энергия относительно велика, и вокруг каждого зерна возникают силы поверхностного натяжения. Поверхностное натяжение проявляется тогда, когда поверхность обладает избыточной потенциальной энергией, и действие этой силы направлено на максимально возможное сокращение поверхности. Подобно тому как поверхность отдельных пузырьков в мыльной пене стремится к сокращению, площадь поверхности границ зерна в железе тоже стремится к минимуму. Но атомы железа способны перемещаться, только если оно сильно разогрето. В результате отжига железа — нагревания его до высокой температуры и последующего медленного охлаждения — более крупные зерна растут, так как поглощают мелкие зерна. Отжиг — основной способ отпуска (смягчения) железа, стали и многих других металлов.

Но если железо деформировать при низких температурах, зерна разломаются и железо станет тверже. Как и большинство металлов, железо можно обрабатывать методами наклепа, или пластической деформации (дробеструйной обработки, раскатки, перегибов и скручивания). Типичный пример такой обработки — ковка железа, один из самых старинных методов повышения прочности металла.

Однако отжиг и наклеп влияют не только на предел текучести. Подвергнутое наклепу железо может расколоться на куски, вместо того чтобы деформироваться под воздействием напряжения. В таком случае говорят о хрупком изломе, которому подвержены металлы настолько твердые, что атомные слои не скользят

Плоскость скольжения

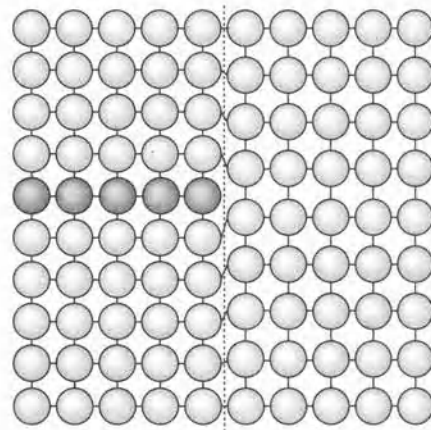


Рис. 17.1.6. Когда в глубине решетки вдруг обрывается один из атомных слоев, происходит дислокация. Здесь дефектный участок показан сверху — выделенный темным слоем в левой половине обрывается, а в правой половине атомные слои растягиваются, стремясь закрыть пробел. Вдоль плоскости скольжения слои смещаются достаточно легко. Дислокации могут перемещаться в материале за счет тепловой энергии, что приводит к размягчению материала.

❶ 14 апреля 1912 года “Титаник” столкнулся с айсбергом и затонул; тогда считалось, что ледяная глыба пропорола стальной корпус корабля, оставив в нем длинную пробоину. Однако недавние исследования места крушения показали, что истинной причиной трагедии мог быть хрупкий излом. Корабль налетел на препятствие со скоростью 41 км/ч, и холодная сталь, видимо, треснула, вместо того чтобы погнуться.

❷ 15 января 1919 года на севере Бостона взорвалась емкость с патокой высотой 30 м, принадлежавшая компании по производству алкогольных напитков *Purity Distilling Company*; 22 миллиона галлонов вытекшей патоки затопили несколько жилых кварталов, погибли 21 человек и десятки лошадей. По первой версии, это был взрыв, но официальное расследование показало, что хрупкая сталь, из которой была изготовлена емкость, лопнула из-за низкой температуры воздуха (4 °C). *Purity Distilling Company*, дочерняя фирма *United States Industrial Alcohol Company*, выплатила миллион долларов в качестве компенсации ущерба. По иронии судьбы катастрофа произошла накануне введения 18-й поправки к Конституции США, запретившей продажу алкоголя.

относительно друг друга, а отделяются сразу и целиком. Кроме того, чересчур агрессивная обработка может привести к “усталости” металла — поверхностные трещины распространятся вглубь, и металл разломится.

После отжига пластическая деформация возникает в железе раньше излома. Железо становится ковким, то есть его можно вытянуть в процессе пластического деформирования. Отожженное железо вообще ломается главным образом из-за того, что становится тоньше и образуются перешейки. При протяжке узкие участки затвердевают, там возникает большое напряжение, которое раздвигает атомы. Такой тип излома называют вязкопластичным, поскольку ему предшествует пластическая деформация. Максимальное напряжение, которое способен выдержать металл без повреждения, называется пределом прочности на разрыв.

Для ножа способность к пластической деформации и ковкость — весьма полезные свойства. Если из-за большого напряжения лезвие не сможет реагировать упруго, лучше уж погнуть его, чем сломать. Ковкость металла повышается с ростом температуры, потому что тепловое движение благоприятствует перемещению дислокаций и прочих дефектов в кристалле, так что возможно скольжение между многими атомными слоями. В холодном металле дефекты локализованы, поэтому скольжение выражено слабее. Из-за плохой ковкости холодное железо сильнее подвержено хрупкому излому, чем раскаленное. Хрупкий излом холодного металла может иметь катастрофические последствия (см. ❶ и ❷).

Более того, пластическая деформация требует затрат энергии. Когда вы давите на нож и он гнется в том направлении, в котором приложена сила, вы совершаете работу над лезвием, а оно поглощает энергию. Способность металла поглощать энергию в процессе деформации называется ударной вязкостью. Ударная вязкость металла играет огромную роль, когда дело касается корпуса автомобиля, холодного оружия, бронетехники — все они при соударениях гнутся с поглощением энергии. Если бы машины и оружие ломались, вместо того чтобы подвергаться пластическим деформациям, проку от них было бы гораздо меньше. Стекло и окна и очки таят в себе угрозу именно потому, что они не способны к пластическим деформациям. А вот пластиковые окна и очки гнутся и поглощают энергию без изломов, что делает их намного безопаснее.

## Сталь

Добавки углерода превращают железо в сталь — сплав, или смесь металлов, гораздо более пластичный и твердый, чем обычное железо. В разных сортах стали содержание углерода различно. Кроме того, свойства металла радикально меняются в зависимости от способа механической и термической обработки.

Первая небольшая порция углерода, введенная в железо, распределяется по его объему с образованием твердого раствора. На первый взгляд не совсем понятно, что это такое — раствор в твердом веществе, однако нет правила, согласно которому раствор обязан быть жидким. Раствор образуется тогда, когда энергия и энтропия (неупорядоченность) способствуют делению растворимого вещества на атомы, молекулы или ионы и рассредоточению этих частиц в массе другого вещества. Жидкое или твердое, железо способно растворять небольшое количество углерода.

При этом железо остается в виде феррита, а растворенные атомы углерода хаотически распределяются в свободном пространстве между атомами железа. При комнатной температуре в феррите растворяется до 0,01% углерода по весу, в результате чего получается вещество, более твердое, чем чистое железо. Атомы углерода создают локальные дефекты в кристалле феррита, так что атомным слоям уже не так легко скользить относительно друг друга. Ухудшая скольжение, растворенный углерод повышает предел текучести стали.

Только атомы водорода, азота и углерода достаточно малы для того, чтобы внедриться между атомами железа. Но и другие атомы могут замещать атомы железа в кристаллах феррита и также делать железо и сталь более твердыми. Они тоже нарушают кристаллическую решетку, препятствуя скольжению и увеличивая предел текучести стали. В состав многих сортов стали входят фосфор, кремний, марганец, хром и никель — все они повышают твердость раствора замещения.

Если содержание углерода в феррите больше 0,01%, при комнатной температуре он уже не растворится полностью. В стали образуется новый матери-

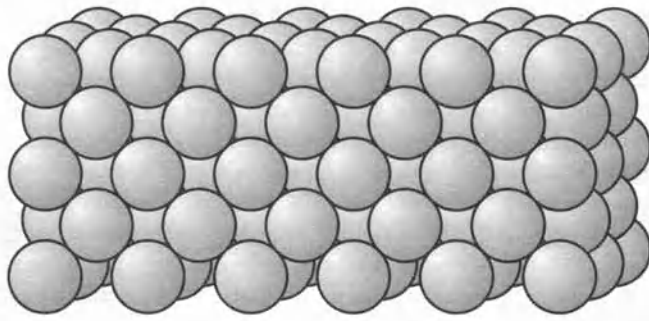


Рис. 17.1.7. При температуре выше 723 °С атомы твердого железа перестраиваются с образованием гранцентрированной кубической решетки. Такая решетка состоит из 8-атомных кубиков (2 × 2 × 2), в центре каждой грани которых находится еще по одному атому.

ал — карбид железа ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ). Карбид железа — чрезвычайно твердое и хрупкое кристаллическое вещество, минерал цементит. Наличие в феррите распределенных по всему объему крошечных кристаллов цементита мешает скольжению и повышает предел текучести стали. Такой способ повышения прочности называется дисперсионным твердением, или упрочнением дисперсными частицами.

Распределение в стали частиц феррита и цементита зависит от количества углерода и от тепловой и механической обработки стали. При медленном охлаждении, начиная с высоких температур, в стали образуется перлит с чередованием слоев феррита и цементита. Перлит содержит около 0,8% углерода по весу. Если углерода в стали меньше 0,8%, возникает избыток феррита, и сталь состоит из перлита, смешанного с ферритом. При содержании углерода больше 0,8% образуется избыточный цементит, и перлит перемежается цементитом.

Однако для качественного ножа важны те свойства стали, которые проявляются только после более тонкой тепловой обработки. В результате нагревания и охлаждения микроскопическая структура стали резко меняется.

При температурах выше 723 °С образуются кристаллы аустенита. Аустенит — это немагнитный материал, в котором атомы железа укладываются в гранцентрированную кубическую решетку (рис. 17.1.7). Аустенит способен растворить больше углерода, чем феррит, — до 0,8% по весу при 723 °С и до 2,06% при 1148 °С. Вторая граница — это верхний предел для материала, который можно называть сталью. Если сталь постепенно нагревать до температур выше 723 °С, присутствующие в ней феррит, перлит и цементит полностью переходят в аустенит — такое преобразование кристаллической решетки называется структурным фазовым переходом (фазовым переходом между двумя твердыми веществами).

Если же снова медленно охладить сталь, произойдет обратный фазовый переход и аустенит опять превратится в феррит, перлит и цементит.

Но еще более эффектные превращения наблюдаются при быстром охлаждении. Если резко понизить температуру аустенита до 650–600 °С и остановиться на этом уровне, получится троостит — перлит с очень тонкими слоями. Чтобы образовался перлит, атомы углерода должны распространиться в массе железа. При низких температурах они не могут перемещаться на большие расстояния, чтобы сформировался перлит с толстыми слоями и грубой структурой, поэтому образуется высокодисперсный перлит. Высокодисперсный перлит менее подвержен скольжению, чем при грубой структуре (крупнозернистый перлит), поэтому его предел текучести выше.

Если резко понизить температуру аустенита до 260–400 °С и выдержать его в этом диапазоне, в нем вовсе не будет перлита. Атомы углерода рассеиваются в столь малом радиусе, что образуются крошечные вкрапления цементита. Это маленькие зерна укладываются между слоями феррита, и образуется так называемый бейнит. Бейнитная сталь отличается более высоким пределом текучести по сравнению с высокодисперсным перлитом.

Аустенит, температура которого быстро упала до уровня ниже 200 °С, превращается в совершенно новый материал. При 200 °С тепловая энергия так низка, что диффузия атомов углерода в массе железа вообще невозможна, поэтому ни цементит, ни перлит, ни бейнит не образуются. Аустенит стремится перейти в феррит, но уже растворенный в нем углерод сохранится. Получается мартенсит — феррит с искаженной структурой, вытянутой в одном направлении.

Поскольку массовая доля углерода в феррите не может быть более 0,01%, мартенсит по сути представляет собой феррит с большим избытком углерода. Раствор, концентрация растворенного вещества в котором превышает равновесную для данной температуры, называется перенасыщенным. Рано или поздно растворенное вещество уйдет из раствора, но лишь спустя какое-то время. Мартенсит — это пересыщенный раствор углерода в феррите, и при комнатной температуре он может оставаться в стабильном состоянии сколь угодно долго. Мартенсит весьма устойчив к скольжению, поэтому сталь, в которой он содержится, твердая и имеет очень высокий предел текучести. Однако мартенсит повышает и хрупкость стали, поскольку уменьшает ее способность к пластическим деформациям. Мартенситная сталь менее прочная, чем сталь с бейнитом и высокодисперсным перлитом.

При резком охлаждении и закалке стали с аустенитной структурой, несомненно, образуются более твердые материалы, чем при медленном понижении температуры. Чем быстрее мы будем охлаждать аустенит и чем ниже температура на первой ступени, тем более твердая получится сталь. Однако для достаточно быстрого охлаждения с образованием мартенсита раскаленную докрасна сталь нужно сразу погрузить в холодную воду. В результате столь жесткого воздействия сталь сжимается и накапливает внутреннее напряжение, которое ее ослабляет. Чтобы уменьшить внутреннее напряжение, закаленную сталь нередко подвергают повторному нагреву — ровно до той температуры, при которой напряжение отчасти снимается само собой. Чем медленнее идет процесс отпуска и чем сильнее нагрев, тем в большей степени снимается напряжение, но и сталь становится мягче.

Закалка углеродистой стали в воде смотрится весьма эффектно — над горячей массой вздымаются клубы пара, но лишь тонкий поверхностный слой металла успевает остыть достаточно быстро и затвердеть в нужной степени. Добавление в сплав других элементов позволяет облегчить формирование мартенсита и снизить скорость охлаждения, необходимую для твердения стали. Процесс твердения легированной стали в масле и на воздухе не производит такого сильного впечатления, зато идет легче и глубже. Такая закалка играет важную роль в производстве ножей и прочих инструментов. Иногда легированные стали подвергают также дисперсионному твердению — в массе остывающего металла мелкие кристаллы различных соединений осаждаются из раствора, благодаря чему металл становится более прочным. В дисперсионно-твердеющей стали чаще всего присутствуют карбид титана, карбид ниобия и нитрид ванадия.

Чтобы изготовить качественный нож, необходимо разбираться в марках стали и методах ее термической обработки, тогда в лезвии и его режущем крае проявятся лучшие свойства металла. Обработка лезвия требует особого внимания. Если в нем сохранится слишком большое напряжение, оно будет твердым, но хрупким, а если отпуск проводится при чересчур высокой температуре, нож быстро затупится.

У хорошего ножа режущий край должен быть тверже основной части лезвия — чтобы этого добиться, надо правильно подобрать химический состав сплава и способ термической обработки. С целью обогащения стали углеродом режущий край нагревают повторно — в пламени или лазером. Благодаря таким технологиям лезвие ножа обладает прочностью высокодисперсного перлита и бейнита, а его режущий край — твердостью мартенсита после тщательно выполненного отпуска. Иногда на лезвии можно разглядеть отличающиеся по цвету и фактуре зоны — последствия специальной обработки. Сочетание материалов с разными свойствами позволяет решать задачи в строительстве, с которыми с которыми ни один материал не справится сам по себе (см. 3).

## Лезвия из нержавеющей стали

Осталось рассмотреть еще одно немаловажное для хорошего ножа свойство стали — ее устойчивость к коррозии. Углеродистая сталь ржавеет, поэтому лезвия ножей часто делают из нержавеющей стали. Коррозионная устойчивость формируется в результате замены по крайней мере 4% атомов железа в стали на атомы хрома. Многие марки нержавеющей стали содержат более 11% хрома по весу, а в состав некоторых сортов входит еще и никель. Никель повышает пластичность и сопротивляемость стали коррозии.

3 Несущие конструкции многих зданий сделаны из стали и бетона. Эти материалы отлично дополняют друг друга. Сталь удивительно устойчива к растяжению, но при сжатии легко гнется. Бетон способен выдержать колоссальное напряжение сжатия, а при растяжении быстро трескается. Однако из стали и бетона можно создать комбинированный материал с сопротивляемостью растяжению, как у стали, и прочностью на сжатие, как у бетона. Предварительное напряжение компонентов железобетона — растягивание стали с одновременным высыхиванием бетона — повышает его качество.

Однако не все сорта нержавеющей стали подходят для ножей. Добавление в сталь хрома и никеля сказывается не только на ее химических свойствах. Кристаллическая структура сплава зависит от того, насколько точно рассчитано соотношение элементов, и от предварительной термической обработки. Пожалуй, ярче всего эффект присутствия хрома и никеля проявляется в том, что при комнатной температуре они с большей вероятностью стабилизируют кристаллическую структуру аустенита, но не феррита.

Самый распространенный сорт нержавеющей стали имеет маркировку 18/8 — такая сталь содержит примерно 18% хрома и 8% никеля. Она состоит исключительно из немагнитных зерен аустенита. Поскольку сталь марки 18/8 существует в виде аустенита, то даже при комнатной температуре в ней не образуются ни цементит, ни мартенсит, поэтому ее нельзя отвердить термическими методами. На самом деле перегрев снижает коррозионную устойчивость стали (см. ❸). Сделать нержавеющую сталь 18/8 тверже можно лишь одним способом — наклепом. Но поскольку наклепом добротного режущего края не добиться, для ножей сталь 18/8 — не лучший материал. Хотя из этой недорогой, пластичной, хорошо поддающейся обработке стали делают неплохие столовые приборы для кафе и ресторанов. В следующий раз, когда вы приметесь нарезать продукты тупым ножом и лезвие изогнется, можете сделать вывод, что оно изготовлено из мягкой аустенитной нержавеющей стали.

Повысить прочность нержавеющей стали можно двумя способами — за счет формирования мартенсита и дисперсионным твердением. В мартенситной нержавеющей стали никеля либо очень мало, либо вовсе нет, а углерода относительно немного. При нехватке никеля для стабилизации аустенита нержавеющая сталь с мартенситной структурой кристаллизуется как обычная, обладающая магнитными свойствами сталь. Закалка горячей мартенситной нержавеющей стали приводит к формированию мелких кристаллов мартенсита, и металл становится тверже.

Дисперсионно-твердеющая нержавеющая сталь содержит легирующие добавки, которые при закалке образуют твердый осадок в виде кристаллов. Титан, ниобий, алюминий, медь и молибден растворяются в раскаленной стали, а при охлаждении осаждаются в виде крошечных кристалликов. Эти кристаллики повышают твердость стали.

Кухонные и столовые ножи высшего качества обычно делают из мартенситной или дисперсионно-твердеющей нержавеющей стали. Они прочны, почти не гнутся, и их режущий край служит долго. Однако при производстве ножей из стали этих марок необходимо очень точно выполнить термическую обработку, поэтому они дороже рядовых столовых приборов.

## Как делают сталь

Сейчас выпускается огромное множество сортов стали, и процесс ее варки не менее сложен, чем высокотехнологичное производство полупроводниковых материалов. Эпоха дымных, грязных сталеплавильных цехов миновала, поскольку современный качественный металл должен отвечать строго определенным химическим показателям.

Обычно в производстве стали выделяется две стадии — сначала из железной руды получается чугун в чушках, а из него уже делают сталь. Раньше обе стадии представляли собой отдельные производства и сопровождались множеством независимых ступеней. Но на современном сталелитейном предприятии железная руда проходит один непрерывный путь до конечного продукта — стали.

Железная руда состоит из смеси оксидов железа —  $Fe_2O_3$ ,  $Fe_3O_4$  и  $FeO$ , поэтому надо каким-то образом убрать из нее атомы кислорода и превратить руду в железо. Для этого добавляют углерод. При нагревании оксида железа с углеродом последний вступает в реакцию с кислородом, образуя оксид и диоксид углерода. Газы уходят, и остается чушковый чугун, смесь железа с углеродом.

Необходимый для осуществления этого процесса углерод получают нагреванием угля до очень высоких температур. Уголь химически разлагается с выделением таких продуктов, как ацетилен, легкие углеводороды, каменно-угольная смола и аммиак, каждый из которых собирается в своем приемнике и в дальней-

❸ В аустенитной нержавеющей стали, например марки 18/8, из-за перегрева могут возникать небольшие дефекты. При температурах от 500 °C до 800 °C хром и углерод могут выпадать в осадок на границах зерен в виде карбида хрома. В результате содержание хрома в граничных зонах падает и резко возрастает вероятность коррозии. Коррозия на границах зерна приводит к тому, что зерно выпадает из структуры и металл разрушается. По этой причине сильно перегретая кастрюля из нержавеющей стали уже никогда не станет как новая.

шем идет на другие нужды. Остается практически чистый углерод — это вещество называется кокс.

Однако и в железной руде, и в коксе есть камни и прочие ненужные примеси, загрязняющие чушковый чугун. Чтобы удалить эти примеси, чугун и кокс смешивают с негашеной известью ( $\text{CaO}$ ) которую получают из известняка ( $\text{CaCO}_3$ ). При высоких температурах известняк играет роль жидкого флюса, который всплывает на поверхности расплавленного чугуна и растворяет лишние компоненты.

Смесь железной руды, кокса и негашеной извести превращается в чугун, когда попадает в доменную печь. Кокс сгорает в потоке воздуха, тем самым поставляя большое количество тепла, необходимое для начала и протекания химической реакции углерода и оксида железа. Известковый флюс уносит большую часть примесных веществ — шлак, который может быть использован в производстве бетона.

Вплоть до 1856 года железную руду перерабатывали только таким способом. Руду превращали в железо большей частью при относительно низких температурах, так что железо вообще не плавилось. Углерод и оксид углерода диффундировали в руде, вступая в реакцию с кислородом, в результате чего из твердого оксида железа получалось твердое железо. Затем из этого железа ковали сварочное железо. Сварочное железо содержало углерод в различных пропорциях и массу шлака.

За последние полтора столетия появились новые эффективные технологии производства стали — плавления чушкового чугуна и удаления из него углерода и шлака. В конвертере Бессемера, мартеновском и кислородно-конвертерном процессах избыточный углерод и ненужные примеси сгорают и удаляются из чугуна. В современной сталелитейной промышленности преобладает кислородно-конвертерный процесс. В емкость с жидким чугуном через охлаждаемые водой трубки — фурмы — подается чистый газообразный кислород. Примеси выгорают, и остается практически чистое железо. Кислород и другие газы, как правило, откачиваются из расплава вакуумным насосом. Превращение чушкового чугуна в сталь занимает около получаса, за процессом следят с помощью одноразовых датчиков, погруженных в жидкий металл и измеряющих его состав.

Чтобы получить сталь нужной марки, в расплавленное железо вводят легирующие добавки, готовый продукт выпускается из днища конвертера в серию емкостей. На установке непрерывного литья сталь отливается в сплошные, раскаленные докрасна слитки, которые выходят из литейных форм. Слитки выравнивают и отправляют на прокатные установки. Там сталь приобретает ту или иную форму — скажем, бруса или листа. Весь процесс так хорошо отлажен, что производство не останавливается ни на минуту. Можно даже изменить состав стали, не останавливая линию.

На завершающем этапе сталь раскатывают в разные формы, постепенно меняя размеры заготовок под очень большим давлением и при высоких температурах. Иногда обработке подвергается жидкий металл, но гораздо проще иметь дело с раскаленным твердым материалом.

Выходящая из прокатных установок нагартованная (упрочненная наклепом) сталь годится для строительных работ, но чтобы отлить из нее кузов автомобиля или кастрюлю, ее надо сначала сделать более мягкой. Смягчение стали — разупрочнение — происходит в результате отпуска в огромных печах. Рессорно-пружинная сталь — другой крайний случай — подвергается повторному нагреву и закалке, в результате чего после снятия деформации моментально принимает первоначальную форму.

Многие инструменты, в том числе замки и гаечные ключи, должны иметь твердый поверхностный слой на более мягкой сердцевине. Твердая поверхность защищает их от проникающих повреждений, а мягкая середина амортизирует чересчур сильные нагрузки. Слоистая структура создается путем индукционной закалки инструментов — обогащения нагретой поверхности углеродом. Атомы углерода распределяются в поверхностном слое и повышают его способность к закалке. Сломать обработанный таким образом инструмент будет крайне нелегко.

---

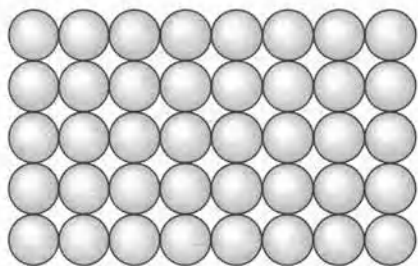


## 17.2 Окна и стекло

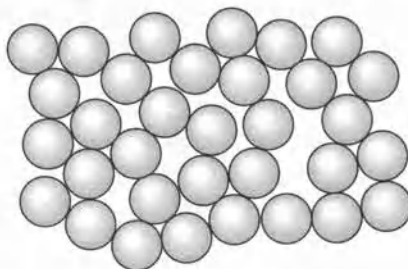
Глядя на улицу в ясный день через чистое оконное стекло, вы его почти не замечаете. Свет проходит в окно с такими незначительными потерями и искажениями, что стекла не видно. Однако вы можете его потрогать — это твердый, негибкий материал, который не пропускает дождь и ветер, но пропускает свет. Кроме того, стекло обладает хорошими термоизоляционными свойствами и помогает сохранить в доме прохладу, а зимой — тепло. Стекло производится из дешевого и доступного сырья при минимальных затратах на труд и оборудование — это поистине замечательный материал.

### Что представляет собой стекло?

а) Твердое кристаллическое вещество



б) Твердое аморфное вещество



Начнем с того, чем стекло не является — это не кристаллическое вещество. В кристалле атомы располагаются в узлах правильной решетки с повторяющимся рисунком, и достаточно знать, где и как размещается несколько атомов, чтобы предсказать положение их соседей (рис. 17.2.1, а). За исключением редких дефектных зон, атомы выстроены так аккуратно, что можно описать составленную из тысяч и даже миллионов атомов структуру в любом направлении. Такая пространственная закономерность называется дальним порядком.

Стекло — это аморфное вещество, которое не имеет дальнего порядка (рис. 17.2.1, б). Размещение нескольких атомов почти ничего не говорит об ориентации других атомов. Атомы в стекле расположены беспорядочно, как в жидкости, ибо по сути стекло и есть застывшая жидкость. Его атомы хаотически перемешаны, но сдвинуться и образовать более правильную структуру они не могут. В такое специфическое аморфное состояние стекло приходит, когда остывает настолько быстро, что не успевает организовать себя из жидкой фазы в кристаллическую структуру.

Если бы расплавленное стекло было обычной жидкостью, то при охлаждении оно затвердело бы, как только его температура сравнялась бы с температурой замерзания. С этого момента атомы начали бы перестраиваться в кристаллическую структуру, и кристалл рос бы до тех пор, пока не израсходуется вся жидкость. Собственно, это мы обычно имеем в виду, когда говорим о замерзании.

Но не все жидкие вещества спешат кристаллизоваться, когда их охлаждают чуть сильнее, чем до температуры замерзания. Несмотря на то, что они остыли в достаточной степени для роста кристаллов, что-то должно инициировать кристаллизацию. Без этого атомы и молекулы вещества так и будут перемещаться относительно друг друга, и вещество будет вести себя как жидкость. В таком случае говорят, что жидкость переохлаждена.

Переохлаждение характерно для жидкостей, в которых затруднено образование зародышевых кристаллов, затравки для кристаллизации оставшегося вещества. Поскольку атомы зародышевого кристалла почти всегда находятся на его поверхности, там развивается довольно большое поверхностное натяжение и накапливается поверхностная энергия. Пока кристалл не достиг некоей критической величины, он остается нестабильным и стремится не к росту, а к разрушению. Но как только сформируется первое стабильное зерно, процесс переходит в так называемую стадию зародышеобразования, и уже вся переохлажденная жидкость

**Рис.17.2.1.** (а) Твердое кристаллическое вещество имеет дальний порядок, то есть по расположению атомов на одном конце кристалла можно судить о том, как они выстраиваются на другом конце. (б) Твердое аморфное вещество не имеет дальнего порядка.

может кристаллизоваться с поразительной скоростью. В разделе 7.2 мы видели, что вода способна перегреваться, если температура кипения превышена, а зародышевые пузырьки пара не образовались. Здесь же возможно переохлаждение жидкости, если при температуре ниже температуры замерзания не образуются зародышевые кристаллы.

При температуре чуть ниже порога замерзания связи между атомами стекла рвутся раньше, чем успевает сформироваться затравка, и активное кристаллообразование может так никогда и не произойти. Стекло становится переохлажденной жидкостью. При более низких температурах начинают зарождаться затравочные кристаллы, но высокая вязкость стекла не дает им расти быстро. Стекло надолго остается переохлажденной жидкостью. При дальнейшем понижении температуры стекло становится таким вязким, что рост кристаллов прекращается. Теперь это стабильная переохлажденная жидкость, которая может сохраняться в таком виде чуть ли не вечно. В этом температурном диапазоне стекло все еще достаточно текучее, его можно вытянуть, можно отлить из него что угодно, в том числе оконные стекла.

Но при еще более сильном охлаждении стекло переходит в стеклообразное состояние. Под этим термином подразумевается специфическое физическое состояние — разновидность твердого аморфного вещества. Не путайте обычное стекло — строительный материал — со стеклообразным состоянием вещества. Стекло переходит в стеклообразное состояние при температуре стеклования ( $T_g$ ). Ниже температуры стеклования относительного перемещения атомов стекла почти не происходит; имея запас внутренней энергии, атомы совершают колебания, но в массе вещества не перемещаются.

По одному только виду стекла невозможно понять, когда начнется фазовый переход. Обычно это происходит, если вязкость стекла становится выше  $10^{12}$  Па·с, где Па·с — единица измерения вязкости в СИ. С этого момента текучесть жидкости затруднена — то есть затруднено перемещение атомов на микроскопическом уровне. Атомы практически стоят на месте, и жидкость течет так медленно, что стекло почти не отличается от твердого вещества.

Чтобы наглядно показать сходство стекла с твердым веществом, посмотрим, как реагируют жидкости и твердые вещества на напряжение сдвига. Если вы приложите напряжение сдвига к вязкой жидкости, подтолкнув ее верхний слой вправо, а нижний влево, верхушка потечет направо, а нижние слои — налево (рис. 17.2.2). А если напряжение сдвига приложить к твердому веществу, в нем разовьется деформация сдвига. Для того чтобы верхняя половина стального бруска “потекла” направо, а нижняя — налево, вам придется сломать брусок. Жидкость же обязательно потечет при малейшем напряжении сдвига. По-видимому, в этом заключается коренное отличие в реакции твердых и жидких веществ на напряжение сдвига — твердые вещества подвергаются деформации сдвига, а жидкости текут.

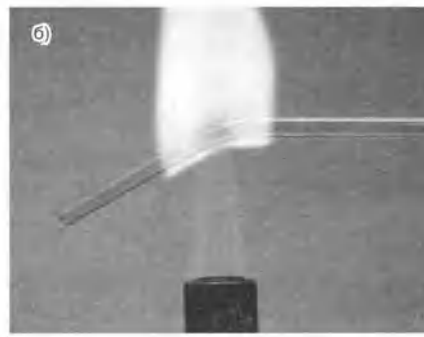
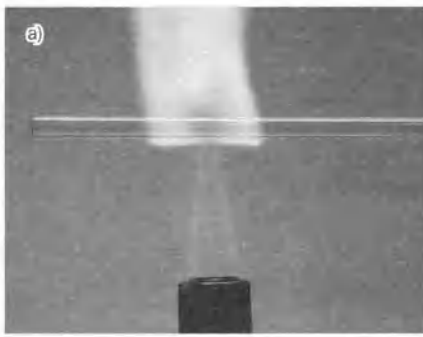
Что же произойдет, если напряжение сдвига приложить к жидкости с очень высокой вязкостью? Течение жидкости настолько затруднено, что она скорее подвергнется деформации сдвига! Она упруго изогнется, словно твердое кристаллическое вещество! Если достаточно быстро снять напряжение, жидкость вернется почти в первоначальное состояние. Но если, прежде чем снять напряжение, выдержать паузу, жидкость успеет потечь и напряжение снимется само собой. Вы можете убедиться в этом воочию, согнув палочку из ириса. Согните ириску на мгновение, и она проявит упругость твердого вещества. Но если вы согнете ее и подержите в таком состоянии, ириска потечет, чтобы уменьшить напряжение сдвига.

Чем больше вязкость жидкости, тем больше времени требуется для того, чтобы жидкость потекла и напряжение сдвига таким образом было снято. В текучих жидкостях — например, в воде — напряжение исчезает быстро, а стеклу, при его вязкости  $10^{12}$  Па·с, для этого требуются минуты, а то и часы — запаситесь терпением, если хотите обнаружить у стекла свойства жидкого вещества. Если вы не готовы терпеливо ждать, пока стекло потечет, оно так и останется для вас твердым и упругим, как любое твердое вещество (рис. 17.2.3).

В процессе перехода в стеклообразное состояние происходит еще одна переменная — с понижением температуры стекло сжимается уже не как жидкость, а как твердое вещество. На с. 258 я говорил, что жидкие вещества при охлаждении сжимаются быстро, потому что их подвижные атомы “упаковываются” плотнее, в то время как тепловая (внутренняя) энергия уменьшается. Твердые вещества



**Рис. 17.2.2.** Вязкость говорит о способности слоев жидкости смещаться относительно друг друга. Чем больше вязкость, тем более значительное напряжение сдвига требуется для того, чтобы нижние слои жидкости достаточно быстро текли влево, а верхние — вправо.



**Рис. 17.2.3.** (а) При температуре, не достигающей уровня стеклования, стеклянная палочка ведет себя как твердое вещество и на усилии отвечает упруго. (б) Если температура стеклования превышена, палочка проявляет свойства вязкой жидкости и медленно гнется под собственной тяжестью. Вблизи раскаленного известково-натриевого стекла пламя горелки — желтое из-за паров натрия, которые излучают интенсивный желтый свет с длиной волны 590 нм (см. с. 490).

при охлаждении сжимаются медленнее, потому что их атомы не перестраиваются. При температуре выше температуры стеклования стекло по мере остывания сжимается быстро, словно жидкость. Ниже температуры стеклования охлаждаемое стекло сжимается медленно, подобно твердому веществу\*.

## Что содержится в стекле?

Теперь, когда мы получили представление об особенностях стеклообразного состояния, давайте посмотрим, что у стекла внутри. Оконное стекло — это главным образом диоксид кремния ( $\text{SiO}_2$ ), компонент кварца и кварцевого песка, он же кремнезем. Кремнезем чрезвычайно широко распространен в природе, он является основой земной коры. Это твердое, прозрачное, устойчивое к агрессивным химическим средам вещество. Кроме того, это лучший в мире стеклообразующий материал.

Хороший стеклообразующий материал должен плохо образовывать зародышевые кристаллы и препятствовать их быстрому росту. Кремнезем обладает исключительно высокой вязкостью при температуре замерзания, что делает его отличным стеклообразующим материалом, который легко превратить в кварцевое стекло, или стекловидный кварц.

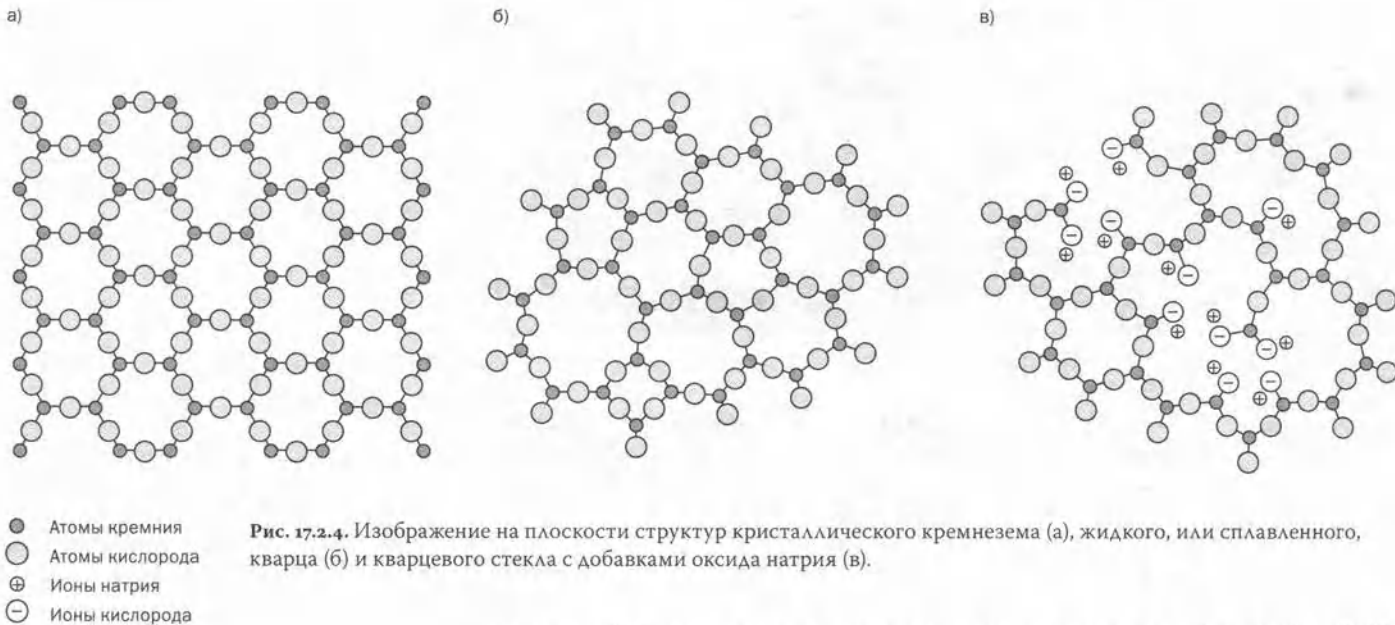
Структура кремнезема держится за счет ковалентных связей, точно как в жидкости. Ковалентная связь образуется между двумя атомами, которые делят меж собой общую пару электронов. В результате такого обобществления избыточный отрицательный заряд заключен между положительно заряженными ядрами, поэтому электростатическая потенциальная энергия атомов уменьшается. Кроме того, стоячие волны делокализованных электронов распределяются на оба атома, благодаря чему уменьшается кинетическая энергия электронов. В результате “расползания” волны ее длина увеличивается, а увеличение длины волны электрона, как и длины волны фотона, приводит к уменьшению энергии.

Ковалентные связи имеют четкую ориентацию. Каждый атом кремния в кремнеземе образует ковалентные связи с четырьмя атомами кислорода, которые расположены примерно в углах тетраэдра. Каждый атом кислорода в кремнеземе образует ковалентные связи с двумя атомами кремния, расположенными в двух углах тетраэдра. В итоге складывается решетка с замысловатым рисунком, где каждый атом кислорода служит мостиком между двумя ближайшими атомами кремния. Из-за способности оксида кремния формировать такие цепочки его называют структурообразователем.

В кристаллическом кремнеземе образуется строго упорядоченная трехмерная решетка, которую трудно увидеть со всех сторон. Чтобы понять, как она устроена, давайте рассмотрим плоскую решетку с аналогичными параметрами (рис. 17.2.4, а). В упрощенной модели каждый атом кремния связан только с тремя атомами кислорода, которые находятся в углах равностороннего треугольника. Каждый атом кислорода связан с двумя атомами кремния, расположенными по разные стороны от него. Даже эта сильно упрощенная картина дает представление о том, насколько сложна и стройна структура кристалла кварца. Зная позиции двух-трех атомов в решетке, вы можете предсказать, где будут располагаться все остальные.

Если вы расплавите кремнезем, ковалентные связи между атомами сохранятся, но партнеры будут постоянно меняться. Вместо строго упорядоченной

\* Иногда стекло все-таки кристаллизуется или “расстекловывается”. Как правило, это означает, что больше его использовать нельзя, так как стекло при этом теряет свою механическую прочность, прозрачность и другие рабочие характеристики.



**Рис. 17.2.4.** Изображение на плоскости структур кристаллического кремнезема (а), жидкого, или сплавленного, кварца (б) и кварцевого стекла с добавками оксида натрия (в).

решетки образуется запутанная сеть взаимосвязанных колец (**рис. 17.2.4, б**). Количество соседей у атомов кремния и кислорода не изменится, но число атомов в кольце может быть уже другим.

Единожды нарушенный порядок кристаллической решетки кремнезема восстановить уже вряд ли удастся. Ажурная структура нового жидкого вещества довольно стабильна, а атомам неизвестно, много или мало звеньев в том или ином кольце. Более того, структура жидкого кремнезема по-прежнему удерживается ковалентными связями, которые ограничивают перемещение атомов и обуславливают очень высокую вязкость жидкости. Таким образом, кремнезем является идеальным стеклообразующим веществом, способным при быстром понижении температуры переохладиться и переходить в стеклообразное состояние.

## Известково-натриевое стекло

Однако кремнезем имеет серьезные недостатки. Ковалентные связи так прочно держат его структуру, что до тех пор, пока температура не поднимется до 1650 °С, он не расплавится. Это выше температуры плавления большинства металлов, включая железо и сталь. Конечно, можно изготовить чистое кварцевое стекло, но это вещь особенная и недешевая. Поэтому стекло часто содержит различные добавки — химические вещества, которые понижают его температуру плавления и облегчают производственный процесс.

В стекло для окон обычно добавляют оксид натрия ( $\text{Na}_2\text{O}$ ). В нем тоже есть атом кислорода, но связи между атомами в молекуле не ковалентные, а ионные. Ионная связь образуется, когда атомы превращаются в противоположно заряженные ионы, которые притягиваются друг к другу. В данном случае каждый атом кислорода забирает по электрону у двух ближайших атомов натрия, и образуется смесь отрицательно заряженных ионов кислорода и положительно заряженных ионов натрия.

Если добавить к кремнезему оксид натрия и нагреть их вместе, смесь будет плавиться при более низкой температуре, чем оба ее ингредиента. Смесь, температура плавления которой меньше температуры плавления отдельных компонентов, называется эвтектической смесью. Когда содержание оксида натрия достигает 25% по весу, такая смесь плавится всего лишь при 793 °С. Не менее примечательно и то, что мелкодисперсная шихта\* из порошкообразных кремнезема и оксида натрия тоже плавится примерно при такой же температуре. В процессе плавки кремнезема оксид натрия выступает в роли флюса, благодаря чему производителям стекла нет нужды нагревать шихту до температуры плавления кремнезема.

Причина понижения температуры плавления смеси оксидов натрия и кремния становится ясна из **рис. 17.2.4, в**. Атомы натрия в смеси служат донорами

\* Шихта — смесь исходных материалов, а в некоторых случаях и топлива, в определенной пропорции, подлежащая переработке в металлургических, химических и других агрегатах.

электронов для атомов кислорода, и вещество насыщается положительно заряженными ионами натрия и отрицательно заряженными ионами кислорода. Здесь заряд иона кислорода равен 1. Но иону кислорода, имеющему лишний электрон, для заполнения электронной оболочки нужен только один общий электрон. Поэтому он связывается только с одним атомом кремния, а мостика между двумя атомами кремния не образует.

В натриевом стекле много таких концевых атомов кислорода, на которых структурная сетка рвется. Они ослабляют стекло и понижают его температуру плавления. Хотя снижение температуры плавления играет важную роль в производстве стекла, натриевое стекло уступает чистому кварцевому почти во всех отношениях. Оно мягче и не такое прочное, поэтому его легче поцарапать и разбить. Из-за более высокого вязкого трения оно теряет энергию при изгибе, а при изломе издает глухой звук. Оно менее устойчиво к химическим воздействиям, чем кварцевое стекло. Его можно даже растворить в воде.

Ионы натрия так хорошо растворяются в воде, что она проникает в молекулярную структуру стекла и расщепляет ее. Поэтому можно приготовить водный раствор натриевого стекла и окрасить им какую-нибудь поверхность. Такой раствор называется жидким стеклом, им покрывают скорлупу яиц, чтобы они не усыхали. Жидкое стекло добавляют в средства для стирки, чтобы защитить стиральные машины от коррозии.

Если в натриевое стекло добавить оксид кальция, или негашеную известь (CaO), его растворимость станет существенно ниже. Оксид кальция — твердое вещество с ионными связями, но он не растворяется в воде и делает стекло гораздо более долговечным. Известково-натриевое стекло практически нерастворимо, это самое распространенное в торговле и промышленности стекло. Окна, бутылки, банки — все это сделано из известково-натриевого стекла.

В обоих случаях кремнезем является стеклообразующим, или структурообразующим агентом, а оксиды натрия и кальция — модификаторами. Назначение стеклообразователя — создать сложную структурную сетку, которая придает разжиженному материалу большую вязкость и позволяет переохладить всю массу до температуры стеклования. Роль модификатора — облегчение перехода в стеклообразное состояние и коррекция свойств стекла, которое должно получиться. Что еще важнее, модификатор гарантирует, что стеклообразователь не начнет кристаллизоваться в процессе охлаждения, иначе в производстве возникнет серьезный сбой — расстеклование.

## Другие виды стекол

Стеклообразное состояние могут принимать и многие другие химические соединения и смеси. Чаще всего в таких системах присутствуют атомы кислорода, которые эффективно образуют цепочки с ковалентными связями и, словно мостики, соединяют другие атомы. Но иногда стеклообразные структуры не содержат кислорода, а бывают и такие, что состоят только из атомов металла (❶). Из таких необычных стекол редко делают окна, поэтому мы сосредоточим свое внимание на кислородсодержащих стеклах (таб. 17.2.1).

Кремнезем — не единственное стеклообразующее вещество. Есть и другие материалы, способные образовывать разветвленные сети и при быстром охлаждении переходить в стеклообразное состояние; к таким веществам относятся фосфорный ангидрид ( $P_2O_5$ ), оксид германия ( $GeO_2$ ) и оксид бора ( $B_2O_3$ ). Из них лишь оксид бора имеет промышленное значение, причем только в смеси с кремнеземом.

Изготовить стекло из чистого оксида бора трудно, потому что оно не слишком долговечно и легко растворяется в горячей воде. Однако достаточно прочное боросиликатное стекло находит применение в лабораториях и на кухне под торговыми названиями пирекс (*Pyrex*<sup>®</sup>) и кимакс (*Kimax*<sup>®</sup>). Оно гораздо более устойчиво к перепадам температур, чем известково-натриевое стекло.

Помимо оксидов натрия и кальция, в промышленности используются и другие модифицирующие добавки. В качестве модификаторов к кремнезему и прочим стеклообразующим материалам можно добавить любые оксиды щелочных и щелочноземельных металлов. Различные модифицирующие добавки вносят разнообразные нюансы в механические, химические и оптические свойства из-

❶ Аморфные металлы, или металлические стекла (метглассы), получают путем мгновенного охлаждения жидких металлов. Проводится переохлаждение разбрызгиванием — тонкую струю расплавленного металла льют на крутящееся замороженное колесо. Расплав остывает и затвердевает за миллионные доли секунды, и образуется тонкая, как бумага, лента металлического стекла. Но даже при таком невероятном быстром охлаждении металлическое стекло можно получить только из некоторых сплавов. Аморфные металлы гораздо тверже обычных из-за того, что не имеют подверженной скольжению кристаллической структуры.

вестково-натриевых стекол. Чаще всего вместо оксида натрия вводят оксид калия ( $K_2O$ ), а вместо негашеной извести — оксид магния, или магнезию ( $MgO$ ). Если стекло не должно пропускать рентгеновские лучи — например, стекло кинескопа, — оксид кальция меняют на оксиды бария и стронция ( $BaO$  и  $SrO$ ).

Некоторые химические соединения занимают промежуточное положение между стеклообразователями и модификаторами. Сами по себе они не способны формировать стеклообразную структуру, но в сочетании, скажем, с оксидом кремния легче вступают в процесс образования структуры стекла. Самые распространенные посредники такого рода — оксид алюминия, или глинозем ( $Al_2O_3$ ), и оксид свинца ( $PbO$ ). Алюмосиликатное стекло лучше выдерживает сильный нагрев, чем известково-натриевое, поэтому используется в галогеновых лампах, котлах и стекловолоконных теплоизоляторах. Небольшое количество оксида алюминия часто добавляют в стекло, чтобы оно стало более устойчивым к воздействию атмосферы.

В состав особых оптических стекол входит оксид свинца, который повышает коэффициент преломления. Кроме того, он придает стеклу высокую плотность, твердость и способность поглощать рентгеновские лучи. Хрусталь, из которого делают красивые декоративные изделия и окна, — никакой не кристалл. В его стеклообразную структуру входят в основном оксиды натрия, свинца и кремния. Такое натриево-свинцовое стекло хорошо отражает свет и рассеивает его цвета. Благодаря более сложному рисунку сетки, чем в обычном известково-натриевом стекле, хрусталь жестче и обладает меньшей вязкостью. При ударе о твердый предмет хрусталь издает мелодичный звон\*.

Еще одна важная характеристика оконного стекла — его цвет. Чистое беспримесное стекло, о котором шла речь до сих пор, бесцветно, потому что оно не способно поглощать фотоны видимого света. Цвет стеклу придают различные добавки и дефекты. Цветные стекла в витражах приобретают характерный вид благодаря примесям металлов, например железа, кобальта и меди. Ионы этих металлов имеют множество свободных орбиталей, так что электроны могут перемещаться и поглощать фотоны видимого света. В зависимости от состояния иона и от количества отданных им электронов поглощаются фотоны с той или иной длиной волны.

Железо, ионам которого недостает трех электронов, имеет зеленую окраску, поэтому придает оконному стеклу зеленоватый оттенок. Медь и кобальт, ионы которых потеряли два электрона, — синие; получается синее бутылочное стекло. Нехваткой трех электронов обусловлен фиолетовый цвет марганца. Ионы хрома, отдавшие три электрона, окрашивают стекло в зеленый цвет — это зеленое бутылочное стекло. Ванадий, ионы которого лишились четырех электронов, становится красным. И так далее. Бывает даже особое рубиновое стекло, в его состав входят крошечные частички металлического золота; эти частицы поглощают зеленые и синие лучи, поэтому стекло — красное.

В большинстве случаев правильно смешанное стекло абсолютно однородно, в его массе нет расхождений в коэффициенте преломления, из-за чего свет мог бы рассеиваться или отражаться. Но бывает неоднородное стекло — мато-

\* Хрусталь получил свое название от горного хрусталя — прозрачной разновидности кварца, кристаллической модификации кремнезема. Хрусталь и горный хрусталь — разные вещества.

Таблица 17.2.1. Примерный состав наиболее распространенных видов стекла и их применение.

Вид стекла	Состав (весовой)	Применение
Известково-натриевое	73% оксида кремния, 14% оксида натрия, 9% оксида кальция, 3,7% оксида магния, 0,3% оксида алюминия	Оконные стекла, бутылки, банки
Боросиликатное	81% оксида кремния, 12% оксида бора, 4% оксида натрия, 3% оксида алюминия	Кухонная и лабораторная посуда Pyrex®
Свинцовое (хрусталь)	57% оксида кремния, 31% оксида свинца, 12% оксида калия	Посуда и изделия из хрусталя
Алюмосиликатное	64,5% оксида кремния, 24,5% оксида алюминия, 10,5% оксида магния, 0,5% оксида натрия	Стекловолоконные теплоизоляторы и галогеновые лампы

вое, или молочное, которое рассеивает свет, словно облако. Это получается, если при охлаждении частицы одного вида стекла, растворенного в другом, выпадают в осадок; окна из таких стекол гарантируют приватность. Материал, в котором кристаллические частицы осаждаются из раствора в стекле в процессе охлаждения, называется стеклокерамикой, и, как правило, это не прозрачные, а матовые вещества.

## Производство оконных стекол

Производство стекол намного проще производства стали. В принципе, надо просто смешать сырье (шихту), расплавить смесь до жидкого состояния и в процессе охлаждения отлить готовое изделие. Если температурный интервал, в котором могли бы сформироваться и вырасти зародышевые кристаллы, в процессе охлаждения будет пройден быстро, расплав превратится в стекло. Тем не менее в производстве стекла и изделий из него, особенно окон, есть несколько любопытных моментов.

Сырьем для известково-натриевого стекла служат самые обычные минералы. Оксид кремния ( $\text{SiO}_2$ ) получают из кварцевого песка и песчаника. Углекислый натрий ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), который при нагревании разлагается на оксид натрия ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) и углекислый газ ( $\text{CO}_2$ ), встречается в природе повсеместно в виде минерала под названием трона, или египетская соль, а кроме того, его можно получить в результате реакции карбоната кальция с солью. Известняк (карбонат кальция), широко распространенная осадочная порода, при нагревании разлагается на оксид кальция ( $\text{CaO}$ ) и углекислый газ ( $\text{CO}_2$ ).

Три перечисленных минерала нагревают вместе в большом керамическом резервуаре примерно до  $1500^\circ\text{C}$ . При этой температуре оксид натрия выступает в роли флюса и способствует плавлению двух других минералов. Шихта довольно быстро становится жидкой. Поскольку смесь состоит из различных веществ, ее тщательно перемешивают, чтобы расплавленное стекло было однородным.

Минеральная смесь выделяет газы — преимущественно диоксид углерода, водяной пар и скопившийся воздух — и потому пенится. Одна из самых трудных задач в стекольной промышленности — не дать образоваться пузырькам. Для этого расплав осветляют — выжидают, когда пузырьки поднимутся на поверхность, и добавляют немного присадок (обычно соединений мышьяка и сурьмы), чтобы пузырьки быстрее улетучились.

Наконец стекло охлаждают до рабочей температуры  $800^\circ\text{C}$ , быстро минуя область вероятного зарождения кристаллов. В процессе охлаждения вязкость расплава значительно возрастает. В резервуаре создается зона плавления с вязкостью расплава около  $10\text{ Па}\cdot\text{с}$ , что в  $1000$  раз больше вязкости воды. При  $800^\circ\text{C}$  его вязкость достигает  $1000\text{ Па}\cdot\text{с}$  — в  $100\,000$  раз больше, чем вязкость воды. Из густого, как сироп, расплава уже можно отливать бутылки и оконные стекла.

Чтобы изготовить бутылку, ком расплавленного стекла впрыскивают в форму и дуют воздух, в результате чего внутри образуется полость. На этой стадии получается горлышко бутылки, соединенное с еще не надутым пузырем строго определенной геометрии. Затем выдувают пузырь, и образуется некий объем, куда можно будет что-то налить. Далее стекло медленно охлаждают, минуя область температуры стеклования, — и бутылка готова.

Оконные стекла делают, наливая жидкую стекломассу в ванну с расплавленным оловом (рис. 17.2.5). Так называемый флоат-процесс — технология изготовления термополированного стекла, разработанная в 1959 году, — произвел революцию в производстве оконных стекол. При изготовлении плоского стекла труднее всего всегда было добиться идеально ровной поверхности с обеих сторон. Верхняя



Рис. 17.2.5. Чтобы изготовить термополированное стекло, жидкую стекломассу разливают по поверхности расплавленного олова. Выходящая из плавильной камеры лента из жидкого стекла охлаждается и затвердевает. На завершающей стадии стекло подвергают обжигу в тоннельной печи, после чего нарезают на листы.

сторона получалась ровной сама по себе, а вот нижняя принимала форму того, что было под ней. Если стекло разливается по жидкому металлу, его нижняя сторона опирается на другую идеально ровную поверхность. Поэтому обе стороны готового листа термополированного стекла получают одинаково гладкими и ровными.

Такая технология становится возможной благодаря крайне удачному стечению обстоятельств. Во-первых, олово плавится при относительно низкой температуре 232 °С, а кипит только при 2260 °С. В этом интервале стекло затвердевает, в то время как олово остается жидким. Во-вторых, плотность расплавленного олова намного больше плотности расплавленного стекла, поэтому стекло всплывает на поверхности металла, поддерживаемое выталкивающей силой. В-третьих, олово и стекло абсолютно не смешиваются друг с другом — в олове формируются металлические связи, а структура стекла обеспечена ковалентными и ионными связями. Два жидких вещества не соединены прочными взаимодействиями, а существуют по отдельности. Жидкое олово не оказывает химического воздействия на разлитое по его поверхности стекло.

Вылитое на олово горячее стекло естественным образом растекается в слой не толще 6 мм. Мастер может увеличить сечение листа, нагнетая жидкую массу до нужной толщины. Если нужно сделать более тонкое стекло, расплав разгоняют по поверхности олова, чтобы уменьшить толщину слоя. Таким способом можно изготовить очень гладкое и ровное стекло толщиной от миллиметра (и даже меньше) до нескольких сантиметров.

Температура стеклования смеси оксидов натрия, кальция и кремния, которая используется во флоат-процессе, составляет примерно 540 °С. На выходе из ванны с оловом температура расплава уже несколько ниже. Но быстрое изменение температуры стекла на поверхности олова приводит к тому, что стекломасса сжимается и возникают напряжения. Если в этот момент стекло просто охладить до комнатной температуры, напряжения так и останутся, а стекло получится менее прочным. Кроме того, из-за напряжений оно будет двоякопреломляющим, то есть будет по-разному реагировать на поляризованный свет и искажать проходящие через него лучи.

Чтобы уменьшить внутренние напряжения, необходимо точно рассчитать режим отжига стекла в туннельной печи — лере. Отжиг проводится примерно при температуре стеклования в течение длительного времени, так чтобы атомы успевали перегруппироваться и остаточное напряжение ушло. Когда напряжение будет в основном снято, готовое стекло наконец можно охладить до комнатной температуры. Оптические стекла для фотообъективов и телескопов отжигают еще медленнее. Нередко стекло охлаждается вплоть до температуры стеклования со скоростью менее 1 °С в час. Стекланный диск зеркала 200-дюймового телескопа, который установлен в обсерватории на горе Паломар, охлаждалось с 500 до 300 °С в феноменально медленном темпе — на 1 градус за день.

## Упрочнение стекла

После отжига в лере термополированное стекло готово к использованию. Но сперва надо его нарезать на листы нужного размера. Резка стекла — дело непростое, потому что кристаллической структуры у него нет, а аморфность придает ему особые свойства. Начнем с того, что в стекле не развивается скольжение, поэтому оно не подвержено пластической деформации. Если стекло согнуть, до какого-то предела оно будет реагировать упруго, а затем произойдет хрупкий излом, и стекло треснет. Как только это случится, трещины распространятся по стеклу неконтролируемо, поскольку нет кристаллических зерен, которые препятствовали бы излому или задавали бы его направление.

Сначала всегда образуются поверхностные трещины в тех местах, где из-за дефектов молекулярная структура ослаблена. Даже на самой гладкой поверхности всегда найдутся какие-то дефекты, и любой из них при наличии растягивающего напряжения может спровоцировать растрескивание. С подобными пороками структуры можно бороться (см. 2). Если согнуть стекланный лист, одна из его сторон подвергнется сжатию, а другая — растяжению, и на ней возникнет растягивающее напряжение. Если оно достаточно велико, дефект превратится в трещину, которая распространится в объеме стекла, так что оно сломается.

2 Стекловолокно изготавливают, вытягивая тонкие нити из горячего алюмосиликатного стекла. Горячее стекло — это просто жидкость, поэтому из него можно отлить удивительно тонкие волокна, не опасаясь их сломать. Узкие волокна практически не имеют площади поверхности, то есть поверхностные дефекты не возникают. Таким образом, стекловолокно крайне трудно сломать, оно очень прочное. Его используют как строительный и теплоизоляционный материал.



Не стоит рассчитывать на то, что стекло разломится по прямой, если вы просто согнете его — это ненадежный метод резки стекла. Лучше нанести царапину вдоль намеченной линии алмазным резцом. Резец создает дефекты там, где должна образоваться трещина. Полезно смочить резец, потому что вода тоже создает дефекты и ослабляет структуру стекла. Если затем аккуратно приложить напряжение, механически или резко изменив температуру, обычно удастся разломить стекло по насечке. И все равно стекло часто ломается не там, где надо, так что от него остаются лишь бесполезные осколки.

Разрезать стекло можно также с помощью абразивной пилы. Быстро вращающийся диск, в который включены очень твердые кристаллы, высекает из стекла мелкую крошку. При этом не возникает значительных напряжений, и стекло не ломается. Времени уходит много, зато надежно. Подобные методы применяются для декоративной резьбы по стеклу.

Вырезанное по мерке стекло можно вставить в раму. Окно готово к установке в любом доме и здании. Но для духовки и автомобиля такое стекло не годится. Оно не выдерживает резких перепадов температуры в духовке и несет в себе серьезную опасность во время автомобильной аварии. Устранить эту проблему можно, если подвергнуть стекло термостабилизации и упрочнению.

Для того чтобы стекло духовки стало устойчивым к резким колебаниям температуры, необходимо изменить его химический состав. Известково-натриевое стекло имеет большой коэффициент объемного расширения, поэтому при подъеме температуры оно сильно расширяется, и расширение приводит к возникновению огромных напряжений в стекле. Если одна половина окна духовки сильно нагреется, она расширится и начнет растягивать другую половину. И если возникшее растягивающее напряжение достаточно велико, окно может треснуть и сломаться. Но окна духовок делают из боросиликатного стекла, такого как пирекс. Коэффициенты объемного расширения боросиликатных стекол составляют примерно треть такового для известково-натриевого стекла. Следовательно, чтобы треснуло окно или контейнер из стекла пирекс, требуется гораздо более сильный температурный удар. Поэтому кухонную и лабораторную посуду, как правило, делают из боросиликатного стекла.

Для упрочнения автомобильного стекла надо изменить его механические свойства. Стекло ломается, когда его поверхность начинает разрываться. Если модифицировать стекло так, чтобы для его поверхности наличие напряжения сжатия было нормой, вызвать разрыв будет гораздо труднее и стекло станет прочнее.

Самый эффективный способ создать на поверхности стекла напряжение сжатия — это подвергнуть его термической обработке. Такую закалку проводят, нагревая стекло до размягчения и резко охлаждая его поверхность струей воздуха. Остывая до температуры стеклования, поверхность стекла твердеет и уже не так быстро сжимается с понижением температуры. Однако в массе стекло еще жидкое и сжимается по-прежнему быстро. По мере того как сжимается внутренняя область, на поверхности возникает огромное напряжение сжатия (рис. 17.2.6).

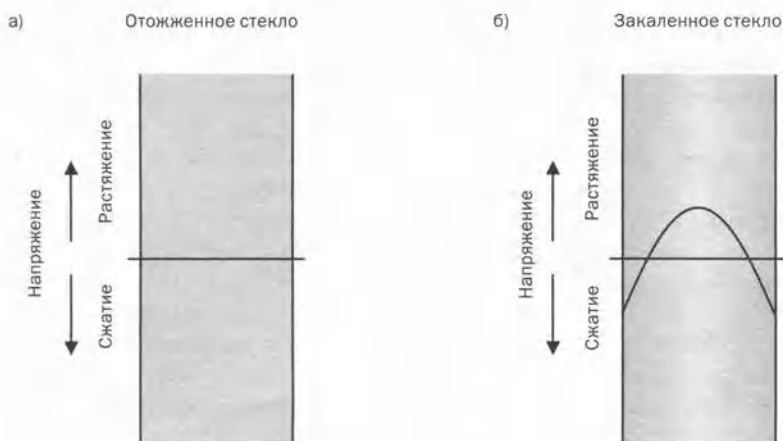


Рис. 17.2.6. (а) При нормальном отжиге внутренних напряжений не возникает. (б) Закаленное стекло подвергается специальной термической обработке, так что на его поверхности развиваются очень большие напряжения сжатия, а в основной массе — большие растягивающие напряжения. Закаленное стекло очень трудно разбить.

Напряжение сжатия существенно затрудняет образование трещин на поверхности закаленного стекла. Сперва надо как следует поцарапать стекло, чтобы напряжение сжатия ушло, а растягивающее напряжение осталось. Чтобы разбить закаленное стекло, необходимо приложить силу втрое больше той, которой хватило бы для обычного стекла.

Закаленное стекло обладает уникальным свойством: разбиваясь, оно крошится на мелкие кусочки, с гранями не более сантиметра. Именно благодаря такому полному “самоуничтожению” закаленного стекла из него можно делать безопасные автомобильные окна. Окно из закаленного стекла нелегко разбить, но если уж оно разобьется, то вдребезги.

Закаленное стекло разлетается в крошку, если в массе своей теряет защиту, которую обеспечивает сжатая поверхность. Весь лист стекла испытывает значительное растягивающее напряжение, поэтому при первой же возможности трескается и ломается. Пока внутренняя масса покрыта кожухом из сжатых поверхностных слоев, трещин в ней не образуется. Но любое “проникающее ранение” приводит к саморазрушению всего листа. Поэтому после термической обработки закаленное стекло разрезать уже не удастся. Автомобильное стекло вырезают до закалки, иначе потом, если вы попытаетесь его разрезать, оно рассыплется.

Окна духовок и полки для холодильников также подвергают термической закалке, чтобы еще более повысить их устойчивость к тепловым ударам. После закалки на поверхности стекла не так легко возникает растягивающее напряжение в условиях большой тепловой нагрузки, и его труднее разбить.

А вот лобовые стекла для автомобилей не подвергают закалке, иначе при падении в них камешков они разлетались бы в крошку. Их делают из пластика, помещенного между двумя листами отожженного стекла. При небольшом повреждении такая трехслойная конструкция не разобьется. Даже если стекло треснет, пластик удержит его и создаст защитный барьер, так что трещина в одном стекле не распространится вглубь до другого стекла. Естественное развитие этой идеи — пуленепробиваемое стекло, которое состоит из нескольких чередующихся слоев стекла и пластика.

## Алмаз

---

Что вы будете делать, если вам понадобится поточить нож из твердой мартенситной стали или нанести на стекло насечку, так чтобы оно разломилось по прямой? Возьмете что-нибудь еще более твердое, чем сталь и стекло, а именно алмаз. Алмаз — это кристаллическая форма чистого углерода, в которой каждый атом соединен с четырьмя другими, так что образуется в высшей степени твердая и жесткая пространственная структура. Существует еще одна разновидность кристаллического углерода — графит, — в которой каждый атом углерода соединяется с двумя соседними атомами и образуется мягкая и подвижная плоская решетка. Как могут две формы одного и того же вещества так разительно отличаться друг от друга?

Углерод — единственный в своем роде элемент. Он на редкость легко образует связи со многими другими элементами. Это прочные ковалентные связи, поэтому возникающие в результате молекулы с трудом распадаются и имеют четкую геометрию. На атомах углерода держится вся органическая химия. Органические соединения — это вещества, молекулы которых строятся на углеродном скелете, и таких соединений гораздо больше, чем образованных любым другим элементом.

“Гибкий” характер углерода проявляется, в частности, в его готовности связываться с двумя, тремя и четырьмя соседями. Так, если один атом углерода соединяется с тремя другими атомами углерода, получается пластинчатый графит, а если с четырьмя — ромбовидная решетка алмаза. Графит столь не похож на алмаз именно из-за различий между плоской и пространственной структурами. Слои графита могут скользить относительно друг друга. Благодаря этому графит — отличный смазочный материал. Если между двумя поверхностями поместить графит, они будут скользить друг по другу с меньшим трением. Смазки на основе графита весьма распространены и эффективны. Слои графита легко гнутся, поэтому графит не отличается твердостью. Несмотря на прочность межатомных связей, вся структура в целом мягкая и податливая.

В алмазе, напротив, смещения практически невозможны. Его атомные плоскости простираются в разных направлениях и не скользят относительно друг друга. Чтобы одна плоскость сдвинулась относительно другой, все ковалентные связи, соединяющие эти плоскости, должны одновременно разорваться, а после смещения — восстановиться. В отличие от металлических связей, ковалентные не допускают такого скольжения. Структура алмаза рвется вдоль какой-то одной атомной плоскости — атомы отделяются друг от друга и больше не соединяются.

Таким образом, алмаз обладает высокой устойчивостью к упругим деформациям, а если предел упругости превышен, он просто разламывается. Это самый твердый из известных нам материалов, с ним конкурирует только нитрид бора. Нитрид бора образован ближайшими к углероду более легким (бор) и более тяжелым (азот) элементами, оттого и напоминает по свойствам алмаз. Кристаллическая структура нитрида бора такая же, как у алмаза.

В то время как графит — вещество вполне обычное, алмаз далеко не так зауряден. Дело в том, что при нормальном атмосферном давлении графит является собой равновесную фазу углерода. Чтобы вам было понятнее, о чем речь, давайте вспомним, как ведет себя вода при 0 °С. При 0 °С\* между жидкой водой и твердым льдом устанавливается фазовое равновесие — молекулы воды покидают лед, переходя в воду, и прибывают в него из воды с одинаковой частотой, поэтому обе фазы сосуществуют одновременно. Но если давление повысится, равновесной фазой станет более плотная вода. Частота вылетов будет больше частоты прибытий, и лед постепенно растает, превратившись в воду. Падение давления до уровня ниже атмосферного приведет к обратному результату — равновесной фазой станет лед, плотность которого меньше, а жидкая вода рано или поздно замерзнет и превратится в лед.

\* Это верно при нормальном давлении.

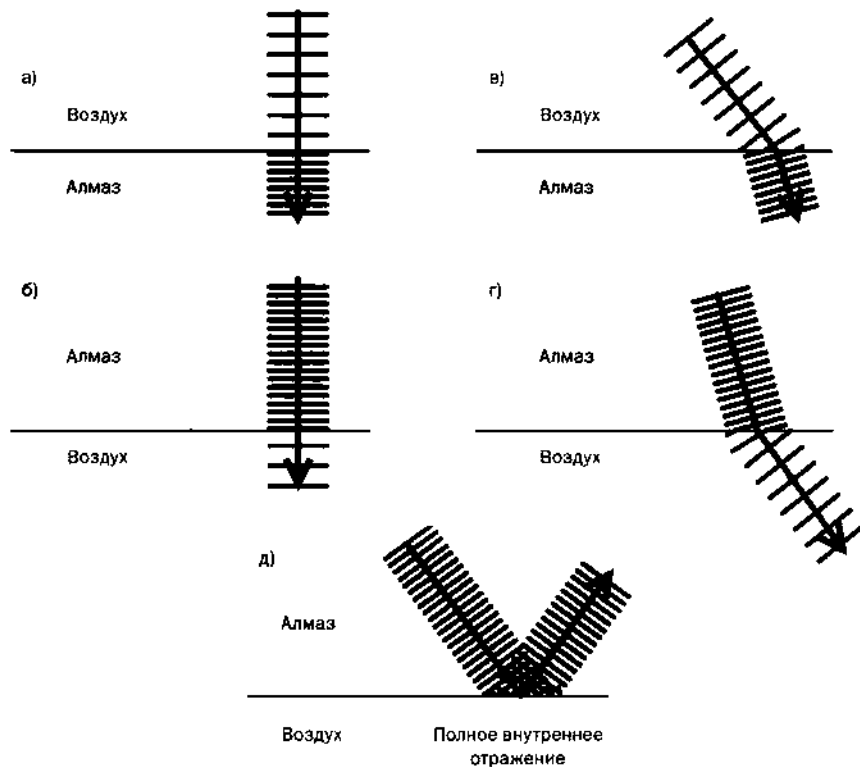
В случае с углеродом при контакте графита с алмазом атомы тоже переходят из одного состояния в другое. При комнатной температуре частота этих переходов, мягко говоря, невелика, однако идея верна. При атмосферном давлении атомы углерода чаще покидают алмаз и переходят в графит, чем вылетают из графита, чтобы прибыть в алмаз, поэтому алмаз мало-помалу превращается в графит, а менее плотный графит становится равновесной фазой. К счастью для любителей бриллиантов и владельцев ювелирных магазинов, при комнатной температуре эта метаморфоза требует столь долгого времени, что наблюдать ее не приходится. Но если нагреть алмаз до 1000 °С (в вакууме, чтобы он не сгорел), он потихоньку превратится в графит. При 1700 °С этот процесс пойдет с заметной скоростью.

С другой стороны, под давлением 50 000 атмосфер атомы углерода чаще вылетают из графита и прибывают в алмазную фазу, чем переходят из алмаза в графит, и графит превращается в алмаз. При столь высоком давлении равновесной фазой становится алмаз! Жаль, что при комнатной температуре это происходит до обидно медленно, и лишь при сильном нагреве скорость процесса становится заметной.

Алмазы так редки именно из-за того, что образуются лишь под воздействием тепла и высокого давления. Натуральные алмазы залегают глубоко под землей, где температура и давление очень высоки, — на глубине десятков миль их множество. Жаль, что мы не можем спуститься туда за ними и вынуждены ждать, когда они сами поднимутся к нам. Чтобы достичь поверхности земли, алмазы должны быстро подняться и остыть, иначе по пути они превратятся в графит. Настоящие алмазы встречаются только в кимберлитовых трубках и дайках. Эти горные образования вулканической природы возникают там, где магма вырывается из недр земли и остывает достаточно быстро для того, чтобы увлекаемые ею алмазы не успели за это время превратиться в графит.

Искусственные алмазы выращивают, имитируя природные условия, в которых они растут глубоко под землей. Зародышевые кристаллы графита и алмазов подвергают воздействию давления 50 000 атмосфер и температуры около 1200 °С. Этим методом, как правило, не выращивают камни, пригодные по величине для ювелирных работ, хотя современные технологии уже выводят на рынок искусственные бриллианты. Однако искусственно выращенные алмазы успешно применяются при производстве режущих инструментов. В этих случаях мелкие искусственные алмазы предпочтительнее дробленых натуральных, потому что искусственные кристаллы имеют аккуратную форму с острыми гранями, а натуральная алмазная крошка — это россыпь кристаллов неправильной формы, которые режут плохо.

**Рис. 17.2.7.** (а) Если луч падает на поверхность алмаза под прямым углом, то его скорость в кристалле снижается, однако луч продолжает распространяться в том же направлении. (б) Если луч выходит из алмаза под прямым углом к поверхности, его направление не меняется, а скорость распространения возрастает. (в) Луч, падающий под углом, преломляется и приближается к перпендикуляру. (г) Луч, выходящий под углом, преломляется и отдаляется от перпендикуляра. (д) Если угол выхода лучей из кристалла намного больше прямого, весь свет отражается — наблюдается полное внутреннее отражение.



Искусственные алмазы применяются и для покрытия поверхностей. Нож или парикоподшипник необязательно делать целиком из твердого материала — можно использовать мягкий с очень твердым покрытием. Один из вариантов такого покрытия — алмазная пленка. Специалисты по материаловедению научились покрывать металлы и керамику карбоновой пленкой, по твердости близкой к алмазу. Они даже умеют делать подобные пленки при низком давлении. Нож с алмазным покрытием останется острым навечно, а подшипники с алмазным покрытием прослужат сотню лет, пока не износятся. Пленки такого рода могут служить антипригарным, не поддающимся царапанью покрытием для кухонной посуды.

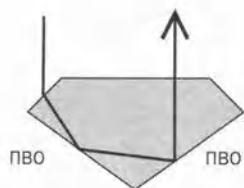
Помимо редкости и твердости, алмазы имеют еще одно свойство, особенно привлекательное для ювелиров, — они преломляют световые лучи и разлагают белый свет на цветные полосы. Это свойство алмазов объясняется их необыкновенно высоким коэффициентом преломления и способностью к рассеянию лучей. Скорость света в алмазе составляет всего 40% скорости света в вакууме, причем фиолетовый свет замедляется значительно сильнее, чем красный.

Давайте вспомним то, что нам уже известно о преломлении и дисперсии света из главы 9, где мы обсуждали механические волны, и из главы 14, где шла речь о световых лучах. Перпендикулярный поверхности алмаза луч проходит прямо, но с меньшей скоростью (рис. 17.2.7, а) и выходит тоже прямо, перпендикулярно поверхности кристалла, но скорость его увеличивается (рис. 17.2.7, б). Луч, падающий под углом, преломляется так, что его направление становится ближе к перпендикуляру (рис. 17.2.7, в), а выходя, снова отклоняется от перпендикулярной линии (рис. 17.2.7, г). Из-за дисперсии фиолетовые лучи приближаются к перпендикуляру и отклоняются от него в большей степени, чем красные.

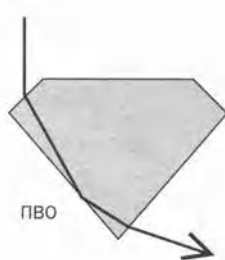
Должен напомнить вам еще об одном, последнем эффекте — полном внутреннем отражении. Если угол выхода луча из алмаза значительно отклоняется от прямого, луч может вообще не пройти наружу. Вместо этого он полностью отразится от внутренней поверхности кристалла (рис. 17.2.7, д). Отражающая способность алмаза обусловлена именно свойством полного внутреннего отражения. Посмотрите сквозь алмазный кристалл, и вы увидите множество “зеркал”. Там нет никакого металлического покрытия, свет отражается только за счет полного внутреннего отражения.

Поскольку алмаз имеет очень высокий коэффициент преломления, луч света, чтобы пройти сквозь кристалл, должен падать почти перпендикулярно. Ко-

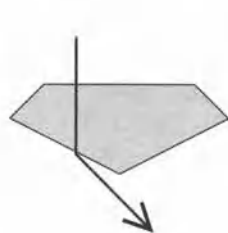
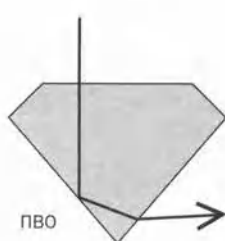
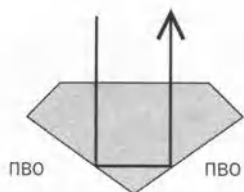
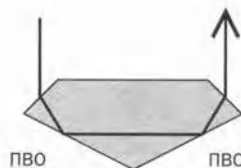
а) Правильная огранка



б) Глубокая огранка



в) Мелкая огранка



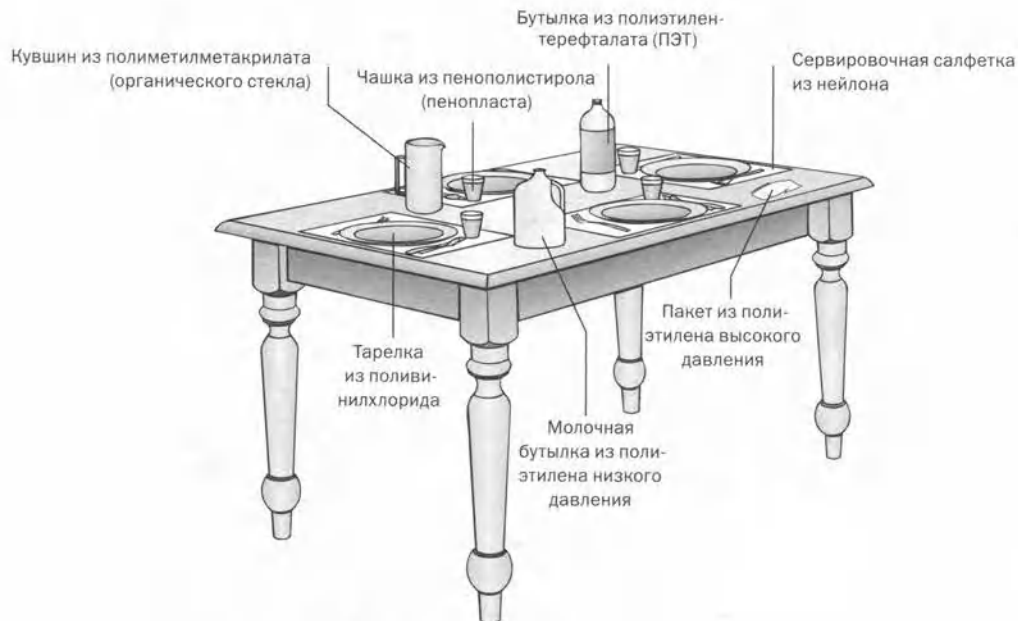
**Рис. 17.2.8.** (а) При правильной огранке алмаза лучи света, входящие в его переднюю и боковые грани, преломляются и возвращаются вверх. Для того чтобы свет отразился от поверхностей алмаза, надо заставить работать полное внутреннее отражение (ПВО). Попадающий в алмаз свет преломляется, а из-за дисперсии его цветные составляющие выходят по отдельности. Искристость бриллиантов и игра света — результат полного внутреннего отражения в сочетании с дисперсией показателя преломления. При глубокой (б) и мелкой (в) огранке свет отражается нежелательным образом, и бриллиант не так ярко сверкает. Большая часть лучей, попадающих на его заднюю грань, проходит сквозь кристалл, не возвращаясь к передним граням.

эффицент преломления стекла гораздо меньше, поэтому диапазон углов выхода света шире. Но если посеребрить заднюю грань украшения из простого стекла, оно будет искриться. И все-таки дисперсия в стекле недостаточно велика, чтобы бижутерия заиграла разноцветными лучами, как бриллиантовая.

В правильной огранке бриллианта (рис. 17.2.8, а) учитывается и преломление света на передней поверхности, и полное внутреннее отражение от задней, так чтобы основная доля входящего белого света возвращалась обратно через передние грани в виде искристых цветных лучей. Солнечный свет распадается на цвета спектра, проходя сквозь передние грани, полностью отражается от задних граней и выходит из передних граней веером разноцветных лучей. Важно содержать бриллиант, особенно его задние грани, в чистоте. Жир и грязь на задней поверхности бриллианта портят эффект полного внутреннего отражения, и алмаз уже не так красиво сияет и переливается всеми цветами радуги.

Чересчур глубокая (рис. 17.2.8, б) или мелкая (рис. 17.2.8, в) огранка алмаза приводит к тому, что не все световые лучи отражаются от задних граней, и бриллиант сверкает не так роскошно, как камень с правильной огранкой. Ему просто недостает искристости. Огранщики алмазов имеют дело с натуральными камнями, поэтому они должны каждый раз рассчитывать, как обтесать данный экземпляр, чтобы добиться нужной геометрической формы при максимально возможном размере готового бриллианта. Одни камни легко превратить в бриллианты идеальной формы, другие менее удобны для обработки, и из них получаются второсортные изделия. Красота и ценность алмаза зависят от огранки не меньше, чем от чистоты кристалла.

Многие другие драгоценные камни и самоцветы также являются кристаллическими минералами. Рубин и сапфир — это разновидности корунда, кристаллического оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ), а цвет им придают различные примеси. В состав рубина входят атомы хрома, голубой сапфир содержит железо и титан. Корунды почти такие же твердые, как алмаз, их трудно поцарапать, и они не стираются. Но кристаллы оксида алюминия несложно вырастить, поэтому искусственные рубины и сапфиры довольно дешевы. Синтетический сапфир, бесцветный благодаря отсутствию примесей, используется очень широко — например, в производстве лазерных окон и самых твердых шарикоподшипников. Изумруд — это минерал берилл, кристаллический алюмосиликат бериллия ( $Be_3Al_2Si_6O_{18}$ ) с примесями хрома. Берилл мягче корунда, поэтому изумруд легче поцарапать.



## 17.3 Пластмассы

До середины XIX века все необходимое для жизни производилось либо из тех материалов, которые можно было добыть в природе, либо из их производных, то есть из дерева, стекла, бумаги, шерсти и каучука. Столь небогатый ассортимент доступного сырья покрывал практически все нужды, но иногда требовалось что-то еще. В 1863 году компания *Phelan and Collander*, производитель бильярдных шаров, назначила премию в 10 000 долларов тому, кто найдет заменитель натуральной слоновой кости, из которой делали шары. На предложение откликнулись работник типографии из Америки Джон У. Хайатт и его брат Исайя; они изобрели способ производства бильярдных шаров из недавно открытого синтетического вещества, нитроцеллюлозы. К 1871 году Хайатт учредил две фирмы, которые работали с новым материалом, получившим название целлулоид, и так родилась полимерная промышленность.

У слова “пластик” масса значений и применений. Как правило, под ним подразумеваются материалы, которые, будучи твердыми в готовом виде, на предыдущих стадиях представляют собой жидкие или мягкие, поддающиеся формовке полупродукты. Из современных пластмасс можно сделать вещи любых форм и размеров с самыми разнообразными физическими и химическими свойствами. А самое главное — развитие производства пластмасс позволило создавать материалы, наиболее подходящие для конкретных целей.

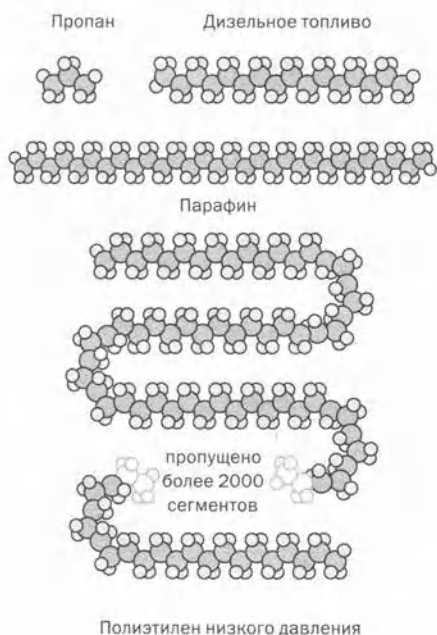
### Полимеры

Пластмассы производятся на основе полимеров — гигантских цепных молекул, составленных из тысяч, а то и миллионов атомов. Атомы в молекулах полимеров, как и в молекулах органических веществ или в стекле, соединены ковалентными связями. Но если пропан, дизельное топливо и парафин состоят из цепочек, насчитывающих 3, 16 и 30 атомов углерода, то в длинной макромолекуле полиэтилена низкого давления (ПЭНД) умещается от 1000 до 3000 атомов углерода (рис. 17.3.1). Полимерной считается молекула, цепочка которой образована не менее чем 1000 атомами. Об истории изучения полимеров см. 1.

Полиэтилен низкого давления устроен довольно просто, поэтому начнем с изучения его структуры. К тому же этот прочный, нетоксичный и устойчивый к воздействию химических реагентов полимер очень широко распространен в промышленности и в быту. Из ПЭНД делают бутылки для воды и пищевые контейнеры, и всем нам хорошо знакомы белые непрозрачные молочные бутылки.

И по виду, и на ощупь ПЭНД похож на парафин, поскольку эти два материала близки по химическим свойствам. В обоих случаях молекулы состоят из атомов

1 Полимеры были открыты задолго до того, как люди поняли, что они из себя представляют. Только в 1920 году немецкий химик Герман Штаудингер (1881–1965) предположил, что полимеры — это огромные макромолекулы, образованные прочно соединенными мелкими молекулами. Он провел скрупулезные экспериментальные исследования и доказал свою гипотезу, за что в 1953 году получил Нобелевскую премию по химии.



**Рис. 17.3.1.** Углеводородные цепочки присутствуют во многих материалах. Они состоят из основной цепочки атомов углерода (большие шарики), к которым “повешены” пары атомов водорода (маленькие шарики). На концах цепочки завершаются дополнительными атомами водорода. Цепи пропана, дизельного топлива и парафина не очень длинные, а вот молекула полиэтилена низкого давления, из которого делают молочные бутылки, насчитывает от 1000 до 3000 атомов углерода.

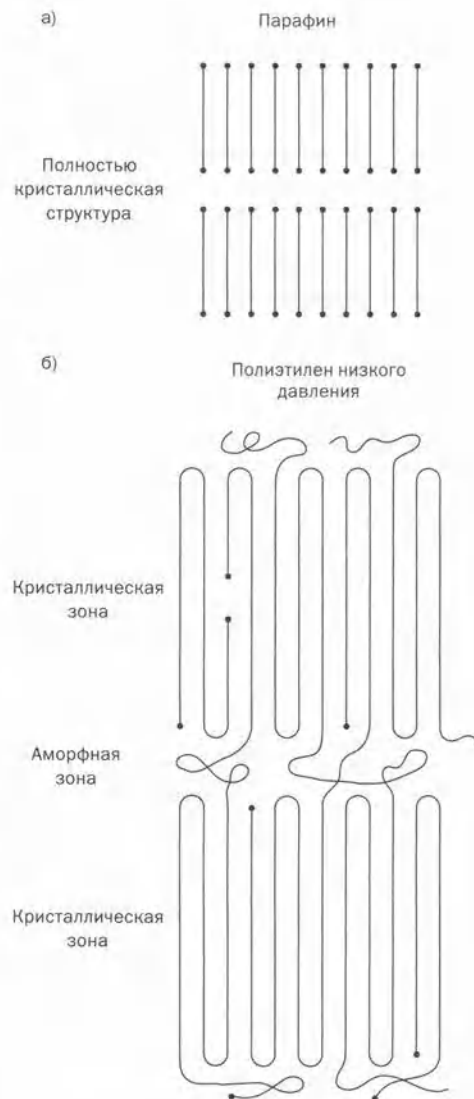
углерода, к которым присоединены атомы водорода. Но из-за большой длины цепочек ПЭНД отличается от парафина рядом важных параметров. Во-первых, ПЭНД плавится при температуре намного выше температуры плавления парафина, что неудивительно для таких больших молекул. Удивляет то, что ПЭНД плавится всего лишь при 140 °С. Процесс плавления довольно сложен, и это одна из любопытных особенностей полимеров.

Во-вторых, в то время как парафин представляет собой кристалл, ПЭНД сочетает свойства кристаллического и аморфного вещества (рис. 17.3.2). Примерно на 80% молекулы уложены аккуратно, словно спагетти в пачке. Оставшиеся 20% молекул переплетены и спутаны, как вареные спагетти. Длинные волосы всегда путаются — и столь же неизбежно образуются эти аморфные зоны. Смешанной структурой полиэтилена низкого давления объясняется его переменный коэффициент преломления — в плотных кристаллических зонах свет замедляется в большей степени, чем в аморфных. Эта неоднородность придает твердому ПЭНД молочную мутность, которая исчезает при плавлении и переходе полимера в жидкое состояние.

Третье — если полиэтилен низкого давления согнуть, он не раскрошится, как парафин. Такую гибкость ему придают аморфные свойства участков с переплетенными полимерными цепочками. Если подвергнуть ПЭНД напряжению, закрученные цепочки расправляются. Там, где цепи спутаны, пути их перемещений не могут разойтись, но все же узлы не препятствуют растяжению полиэтилена вплоть до полуторакратного увеличения длины. На небольшие напряжения материал реагирует упруго, однако при значительных напряжениях возникает пластическая деформация. Если вы слегка надавите на молочную бутылку, она восстановит форму, но если вы ее раздавите, она так и останется раздавленной.

И наконец, у ПЭНД намного выше предел прочности на разрыв, чем у парафина. Молекулярные цепочки парафина достаточно короткие, их удерживают вместе только силы Ван-дер-Ваальса. Это слабые силы межмолекулярного взаимодействия, направленные в разные стороны и обусловленные случайными флуктуациями электрических зарядов в молекулах. Каждая молекула связана с соседней силами Ван-дер-Ваальса. Эти силы столь невелики, что молекулы парафина легко перемещаются относительно друг друга, что может привести к разрушению кристалла. Несмотря на то что цепочки ПЭНД тоже связаны только силами Ван-дер-Ваальса, большая длина и клубки в структуре не позволяют разделить пластик на части. Чтобы разорвать его при комнатной температуре, вы должны фактически разорвать часть молекул.

Полиэтилен высокого давления (ПЭВД) тоже состоит из длинных парафиноподобных молекул, но у них есть еще и короткие ответвления — боковые цепи.



**Рис. 17.3.2.** (а) Парафин — это кристаллическое вещество, структура которого поддерживается только силами Ван-дер-Ваальса. (б) Структура полиэтилена низкого давления на 80% кристаллическая, а на 20% — аморфная, и поддерживает ее переплетение молекулярных цепочек.

Боковые цепи мешают молекулам аккуратно построиться и тем самым препятствуют кристаллизации. Поэтому ПЭВД аморфен примерно наполовину, его структура — это сплошные витки и переплетения.

Механические свойства ПЭВД определяются преобладанием аморфных зон, поэтому при комнатной температуре он мягкий и пластичный. Но предел прочности на разрыв у ПЭВД большой, так как разъединить переплетенные молекулярные цепочки не так уж легко. Из ПЭВД делают в основном мешки для мусора, пакеты для продуктов, сумки, упаковку для сухих непродовольственных товаров, электроизоляцию. Полиэтилен обоих видов хорошо поддается переработке в качестве вторсырья. Полиэтилену низкого давления соответствует знак  $\triangle$ , полиэтилену высокого давления  $\triangle$ .

## Полимеры и температура

При комнатной температуре ПЭВД — и не твердое вещество, и не жидкое. Его можно согнуть без усилий, то есть на обычное твердое вещество он не похож. Он не течет, поэтому и жидкостью его не назовешь. ПЭВД занимает промежуточное положение между твердым веществом и жидкостью, находясь в области, которая называется плато высокой эластичности. Для большинства полимеров можно выделить пять температурных режимов, и плато высокой эластичности — средний из них. При более низких температурах происходит переход из высокоэластического состояния в стеклообразное и упругое состояние, а при более высоких наступает вязкотекучее и текучее состояние.

Эти пять режимов реализуются потому, что длинные полимерные цепи не могут полностью кристаллизироваться при низких температурах, а при высоких не могут полностью расплестись и разъединиться. Полимер не способен принять состояние обычного твердого вещества или обычной жидкости, поэтому его свойства постепенно меняются с изменением температуры.

Ученые выделяют пять стадий постепенного перехода полимеров из одного состояния в другое (рис. 17.3.3). Между ними нет четких границ, тот или иной полимер при нагревании может плавно менять свое состояние. Картину усложняют области кристаллизации в структуре полимера, однако в случаях преимущественно аморфного строения ими можно смело пренебречь. Мы рассмотрим пять состояний полиэтилена высокого давления, вещества скорее аморфного, кристаллические зоны которого можно не учитывать.

При очень низких температурах ПЭВД твердый и ломкий. При температуре не выше температуры стеклования (примерно  $-128\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) его атомы не перемещаются относительно друг друга, и ПЭВД находится в стеклообразном состоянии (рис. 17.3.3, а). Пакет, в который вы складываете продукты в магазине, никогда не замерзает до такого состояния, но многие хорошо знакомые нам полимерные материалы достигают режима стеклования при комнатной температуре. Один из самых известных полимеров этого класса — полиметилметакрилат, или органическое стекло (плексиглас).

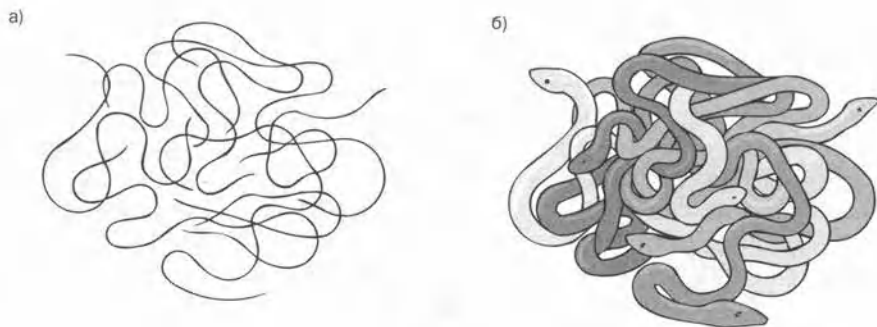
Около  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$  атомы ПЭВД имеют уже достаточный запас тепловой энергии, чтобы совершать относительные перемещения. Но в целом цепные молекулы пока неподвижны (рис. 17.3.3, б). Это стадия перехода из стеклообразного состояния в упругое, когда полимер подобен коже — более или менее твердый, но гибкий. Пример полимера, который находится в этом состоянии при комнатной температуре, — поливинилацетат, основной компонент большинства латексных красок для отделочных работ.

Ближе к комнатной температуре ПЭВД переходит на плато высокой эластичности, его атомы свободно смещаются относительно друг друга, и даже молекулярные цепочки могут немного сдвинуться с места. Но переплетения молекул пока не позволяют достичь текучего состояния (рис. 17.3.3, в), поэтому полимер напоминает гибкую и эластичную резину. В растянутых молекулярных цепочках возникает напряжение, но как только напряжение будет снято, они сожмутся вновь. Однако если растянуть полимерный материал чересчур сильно, цепочки порвутся в местах переплетений и растяжение окажется необратимым, вплоть до разрыва. По этой причине на пакетах с продуктами и мешках для мусора, перегруженных предметами с острыми краями, появляются характерные растяжки и разрывы.



**Рис. 17.3.3.** По мере нагревания полимер последовательно принимает пять состояний, как показано на рисунке сверху вниз. (а) На холоде атомы под воздействием напряжения не смещаются, поэтому полимер находится в стеклообразном состоянии. (б) Атомы менее охлажденного полимера способны медленно перемещаться, но цепные молекулы неподвижны, что соответствует переходному состоянию между стеклообразным и эластичным. (в) При средних температурах атомы и молекулы подвижны, но переплетения цепей мешают их относительному смещению — это режим высокой эластичности. (г) При дальнейшем нагревании цепочки расплетаются, и наступает вязкотекучее состояние. (д) Молекулы горячего полимера легко распрavляются, и полимер течет, как жидкость.





**Рис. 17.3.4** (а) Клубок переплетенных цепных молекул может распутаться, если молекулы скользят вдоль цепочек подобно пресмыкающимся. (б) Эти движения напоминают ползание змей, откуда и происходит термин “рептация”.

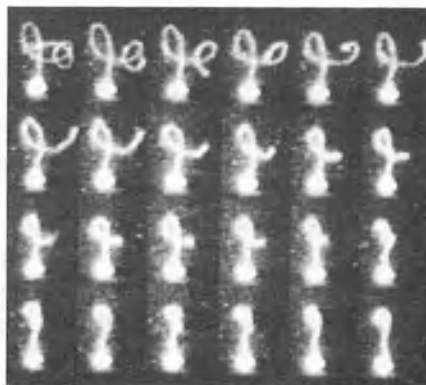
Примерно при 100 °С молекулярные цепочки ПЭВД становятся подвижны настолько, что могут распутаться, и материал переходит в вязкотекучее состояние (рис. 17.3.3, г). Процесс распрямления узлов называется рептацией — тепловая энергия позволяет цепям скользить вдоль друг друга до тех пор, пока переплетения не распутаются. Впервые это явление описал французский физик Пьер-Жан де Жен (1932–2007), а термин “рептация” был предложен за сходство движений молекул с ползанием змеи (рис. 17.3.4 и 17.3.5). Самый известный полимер, который при комнатной температуре находится в вязкотекучем состоянии, — растительная камедь, основной компонент жевательной резинки. Это же состояние свойственно силиконовому полимеру, из которого делают жвачку для рук (*Silly Putty*).

При еще более высоких температурах цепные молекулы полиэтилена скользят относительно друг друга еще легче, и полимер становится текучим, как жидкость (рис. 17.3.3, д). В этом состоянии рептация настолько ускоряется, что расплавленный полимер почти ничем не отличается от любой вязкой жидкости. Текучее состояние при комнатной температуре характерно для полидиметилсилоксана, кремний-содержащего соединения. Благодаря свободному относительно движению длинных цепных молекул это вещество является отличным смазочным средством.

Из-за рептации полимеры проявляют необычайную вязкость даже при высоких температурах. Для того чтобы развязать узелки между цепочками, молекулы должны “ползти” на протяжении больших отрезков своей длины, поэтому при большой длине молекул вязкость полимера будет больше, чем при относительно малой. Теория рептации позволяет точно рассчитать вязкость полимера, которая оказывается пропорциональной кубу средней длины молекул.

Определенные добавки могут изменить свойства полимера таким образом, что он переходит из одного состояния в другое. Химические вещества, которые растворяются в полимере и размягчают его, называются пластификаторами. Они понижают температуру стеклования ( $T_g$ ) и, как правило, сокращают границы области кристаллизации. Поливинилхлорид (или винил) с добавками пластификаторов из твердого при комнатной температуре вещества превращается в подобный коже материал, пригодный для обивки мебели. В жару вы можете ощутить запах паров этих пластификаторов. Со временем они в значительной степени улетучиваются, из-за чего искусственная кожа вновь возвращается в стеклообразное состояние и растрескивается. Еще о применении пластификаторов см. 2.

**Рис. 17.3.5.** Теория рептации позволила с достоверностью предсказать многие свойства полимеров, но само явление рептации удалось увидеть воочию лишь в 1993 году — американский физик Стивен Чу впервые наблюдал его с помощью микроскопа. Чу с коллегами покрыли одну молекулу полимера флуоресцентным красителем и с помощью лазера протаскивали помеченную молекулу по другому полимеру. Молекулярная цепочка прокладывала себе путь сквозь сплетения, извиваясь словно змея, — в полном согласии с теорией рептации.



2 Многие полимеры способны взаимодействовать с водой и хорошо ее растворяют. Растворенная вода выступает в роли пластификатора, понижая температуру стеклования и уменьшая степень кристалличности полимера. Пример такого гидрофильного (то есть любящего воду) полимера — целлюлоза, основной компонент древесины, бумаги и хлопка. Поскольку целлюлоза состоит из моносахаров (глюкозы), вода прекрасно в ней растворяется. Несмотря на то что при комнатной температуре целлюлоза твердая и при нагревании не плавится, а разлагается на мономеры, вода способна сильно размягчить ее. Грубоватые на ощупь сухая бумага и хлопчатобумажная ткань станут мягче, если их намочить. Поэтому, прежде чем протереть салфеткой из целлюлозы полированную мебель, увлажните салфетку, чтобы она не испортила требующую деликатного обращения поверхность. Хозяйственные губки, которые обычно делают из гидрофильных пластиков, в частности из целлюлозы, точно так же становятся мягче при намокании. Иногда губки даже продаются в спрессованном виде, а когда вы первый раз намочите такую губку, она расправится до полного размера и станет мягкой. Способность воды смягчать хлопок используется при глажении одежды из хлопчатобумажных тканей. Если хлопковую материю сбрызнуть водой или увлажнить паром из утюга, вода смягчит волокна, после чего расправить их с помощью тепла будет значительно легче. Шерсть и волосы также являются гидрофильным полимерным волокном, которое можно смягчить водой.

## Термопласты и реактопласты

При высоких температурах молекулы полиэтилена обоих видов (ПЭНД и ПЭВД) движутся независимо друг от друга, поэтому разогретые полимеры ведут себя как жидкость. Оба полиэтилена являются термопластами — веществами, которые поддаются повторному формованию при нагревании. Отдельные термопласты горят и обугливаются раньше, чем успевают расплавиться, но даже их можно растворить в каких-нибудь растворителях, переформовать и высушить.

Однако не все полимеры поддаются повторному формованию. В так называемых реактопластах образуются межмолекулярные химические связи, которые препятствуют рептации. Мостиковые связи превращают полимер в одну гигантскую молекулу, поэтому реактопласт не текуч. Он не плавится при нагревании и может быть в чем-то растворен, только если растворитель порвет шивки между его молекулами.

Раз реактопласты нельзя переформовать, надо сразу придать им нужный вид. Многие реактопласты изначально были термопластами, молекулы которых впоследствии были сшиты — этот процесс в общем смысле называется вулканизацией. В конкретных случаях говорят о дублении (кожи), отверждении (смола) или высыхании (масляной краски). Как мы вскоре убедимся, молекулы многих полимеров сшиты мостиковыми связями.

Молекулы большинства полимеров сшиты из менее крупных молекул. Эти мелкие молекулы называются мономерами, а реакция их соединения — полимеризацией. Образовавшиеся цепные молекулы называют по наименованию исходных веществ — скажем, из этилена получается полиэтилен, а из метилметакрилата образуется полиметилметакрилат.

Во многих случаях многократно повторяется один и тот же мономер, образуя гомополимер. Если обозначить молекулу мономера буквой А, то гомополимерная молекула будет выглядеть как АААААААА... Но в цепочку могут выстроиться разные мономеры. В таком случае получаются сополимеры. Обозначим молекулы мономеров буквами А и Б, тогда могла бы образоваться полимерная макромолекула АБАБАБАБАБ...

Разница между гомополимерами и сополимерами особенно заметна, когда звенья цепи в сополимере соединяются в случайном порядке. Например, макромолекула образуется по схеме АБААБББАБААББААА... Все цепи разные, и вероятность кристаллизации мала. Такие нерегулярные сополимеры, как правило, аморфны.

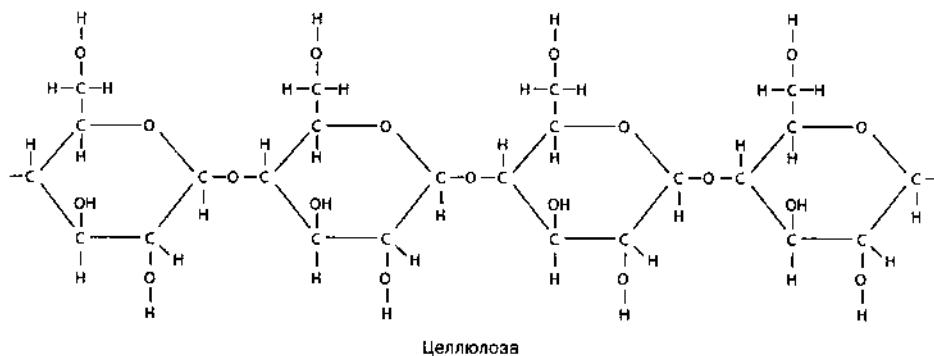
Даже гомополимеры могут иметь нерегулярную формулу, если в процессе полимеризации мономеры меняют ориентацию. Если мономер может встраиваться в цепь как ↑ и как ↓, то макромолекула гомополимера будет, например, ↑↓↑↑↓↑↑↓↑↑... Нерегулярные гомополимеры также аморфны.

## Природные полимеры — целлюлоза, натуральный каучук, волосы

Некоторые наиболее значимые полимеры встречаются в природе, и самые известные из них — целлюлоза и натуральный каучук. Целлюлоза — это основное структурное волокно древесины и растений, на сегодняшний день самый распространенный полимер на нашей планете. Он используется как строительный материал и как топливо, в производстве бумаги, тканей, веревки и канатов, химических веществ. Молекулы целлюлозы состоят из соединенных в цепь молекул глюкозы (рис. 17.3.6). Это неразветвленные, упорядоченные цепи, поэтому целлюлоза легко кристаллизуется. Поскольку целлюлоза на 70% кристалл, а на 30% аморфное вещество, она полупрозрачная или белая. Но хотя она и состоит из молекул сахара, мы не можем ее переварить (см. ❸).

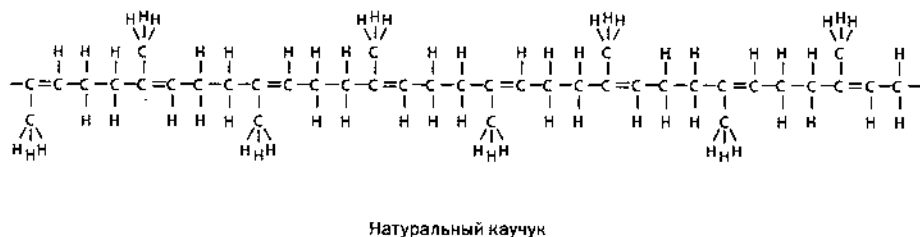
Между атомами кислорода и водорода, которые входят в состав ближайших молекул целлюлозы, возникают прочные водородные связи, и цепочки так хорошо соединяются, что расплавить целлюлозу невозможно — ее можно лишь разрушить. Именно по этой причине дрова в камине горят, а не превращаются в жидкость. Кроме того, целлюлоза имеет довольно высокую температуру стекло-

❸ Мало кто из животных ест целлюлозу: они не могут расщепить ее цепи на молекулы глюкозы. К счастью, некоторые бактерии и простейшие продуцируют ферменты-катализаторы, которые расщепляют целлюлозу, так что высохшие древесина и растения быстро разлагаются. В желудках коров и других жвачных животных присутствуют бактерии и простейшие, способные превращать целлюлозу в маленькие, легкоусвояемые молекулы сахара.



вания — оттого-то дерево твердое. Целлюлоза гнется только в виде очень тонких волокон, из которых состоит хлопок. Хлопок — это почти чистая целлюлоза.

Поскольку в образовании водородных связей в целлюлозе участвуют и молекулы воды, целлюлоза отлично впитывает воду. При поглощении целлюлозой воды получается твердый раствор. Вода проникает в волокна, действуя как пластификатор, благодаря чему волокна набухают и становятся мягче. Когда вода испаряется, разбухшие волокна снова становятся твердыми и неэластичными. Это приводит к усадке материала, что вы и наблюдаете, когда стираете хлопковые вещи. “Смазывание” волокон кондиционерами для тканей уменьшает усадку. Еще о твердых растворах в пластмассах см. 4.



Натуральный каучук — это полимер цис-полиизопрен (рис. 17.3.7), который входит в состав сока тропических деревьев определенных пород. Он состоит из длинных цепочек полимеризовавшихся молекул изопрена. Префикс цис- означает, что изопреновые мономеры поочередно ориентированы вверх и вниз, как показано на рисунке. В деревьях цис-полиизопрен присутствует в виде млечного сока — суспензии крошечных частиц полимера в водянистой жидкости. Когда такой древесный сок высыхает, остаточные молекулы воды стягивают частицы полимера, и каучук коагулирует с образованием эластичного твердого вещества.

Молекулы натурального каучука так ненадежно связаны друг с другом, что он плавится уже при 28 °С, да и температура стеклования у него весьма умеренная — всего лишь –70 °С. Межмолекулярное притяжение слабое, так как цис-полиизопрен не содержит атомов кислорода, то есть водородные связи образоваться не могут. Но даже при низких температурах натуральный каучук плохо кристаллизуется, потому что его молекулы естественным образом скручиваются в спирали различной формы. Именно этим виткам каучук обязан своей потрясающей эластичностью. Когда вы растягиваете кусок каучука, его полимерные молекулы выпрямляются. Если отпустить каучук, молекулы вновь произвольно свернутся.

Такое скручивание — пример естественного стремления системы к неупорядоченности и увеличению энтропии. Прямая молекула каучука упорядочена. Как только вы прекратите ее натягивать, тепловое движение атомов заставит ее изгибаться и перекручиваться в разных точках, пока молекула не превратится в запутанный клубок. То же самое тепловое движение могло бы развернуть молекулу обратно, но вероятность этого события ничтожна.

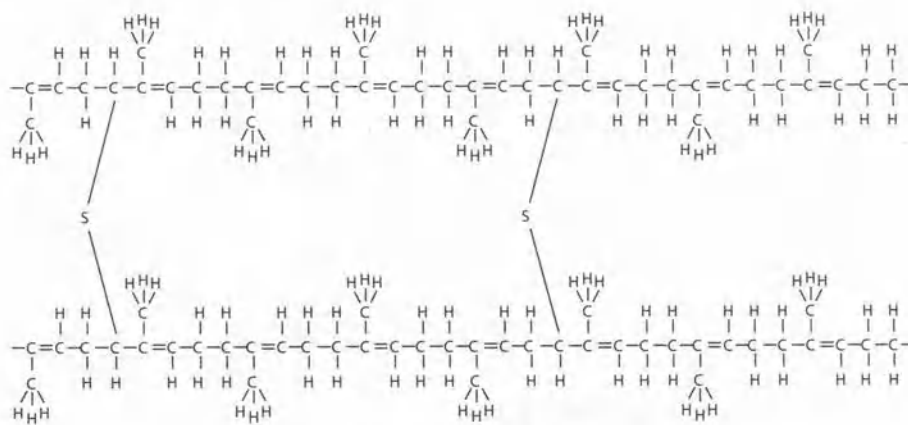
Натуральный каучук нашел практическое применение в 1820 году, когда англичанин Томас Хэнкок основал первую фабрику по производству резины. Спустя три года шотландский изобретатель Чарлз Макинтош использовал каучук для

Рис. 17.3.6. Фрагмент молекулы целлюлозы; показаны пять повторяющихся звеньев — мономеры глюкозы, из которых построена цепь. Каждый атом углерода связан с четырьмя другими атомами, среди которых есть атомы кислорода (O) и водорода (H). Прямые линии обозначают ковалентные связи между атомами. При комнатной температуре целлюлоза — твердое кристаллическое вещество; это основной строительный материал деревьев и растений.

4 Газопроницаемые контактные линзы набухают при увлажнении, что позволяет кислороду растворяться в пластике и проникать к поверхности глаза. Пластиковые бутылки для газированных напитков также впитывают воду, кислород и углекислый газ. Углекислый газ и вода постепенно диффундируют через пластик и улетучиваются, из-за чего газировка в конце концов выдыхается.

Рис. 17.3.7. В этом фрагменте молекулы натурального каучука 8 повторяющихся звеньев, мономеров изопрена, из которых составлена цепь. Изопреновые звенья поочередно ориентированы вверх и вниз. Сами по себе цепные молекулы закручиваются в произвольном порядке, а если каучук растянуть, они выпрямятся. Предел упругости при растяжении каучука достигается тогда, когда молекулярные цепочки полностью выпрямлены.

**Рис. 17.3.8.** Вулканизированная резина — это продукт нагревания натурального каучука с серой. Сера связывает отдельные цепные молекулы каучука, и образуется реактопласт. Вулканизированная резина уже не плавится так, как натуральный каучук. Чем больше серы добавлено в натуральный каучук, тем тверже будет резина.



Вулканизированный натуральный каучук

создания водоотталкивающей ткани. Однако натуральный каучук чувствителен к температуре и из-за этого неудобен в работе. В холодную погоду он представляет собой твердый, эластичный материал, состояние которого соответствует плато высокой эластичности. Но в жару каучук переходит в вязкотекучее состояние и становится липким, как клей.

Знаменитая оплошность американского изобретателя Чарлза Гудьира (1800–1860) привела к революционным переменам в этой области. В 1839 году, потратив десять лет на попытки предотвратить размягчение каучука при повышенных температурах, Гудьир нечаянно капнул на горячую плиту смесь каучука с серой. Получился тот самый материал, который он хотел создать. Твердый, но эластичный, он сохранял свои свойства при любой температуре. Гудьир назвал этот процесс вулканизацией — по имени римского бога огня.

Гудьiru удалось вызвать образование мостиковых связей между молекулярными цепочками каучука (рис. 17.3.8). Он превратил натуральный каучук, какой является термопластом, в реактопласт — вулканизированную резину. Цепные молекулы резины связаны между собой, поэтому они не текут и резина не плавится — возникает гигантская цельная макромолекула.

Вулканизированная резина сохраняет упругость, соответствующую плато высокой эластичности, в широком диапазоне температур. Пока мостиковых связей между молекулярными цепочками не слишком много, неупорядоченные витки будут скручиваться и раскручиваться, а резина при натяжении будет растягиваться. Но чем больше в этом соединении серы, тем больше образуется мостиков и тем жестче получится резина. Таким образом жесткость вулканизированной резины регулируется за счет содержания серы.

Природные запасы натурального каучука весьма ограничены, поэтому в наше время каучук, как правило, производится из нефтяного сырья. Многие синтетические каучуки, или эластомеры, отличаются по химическому составу от вулканизированного натурального каучука, но их полимерные цепи обязательно скручены и соединены мостиковыми связями. Разнообразие структур обеспечивает синтетическим каучукам новые полезные свойства — например, устойчивость к воздействию агрессивных химических сред и высоких температур. О силиконовых каучуках см. 5, а об одном из возможных применений другого природного полимера, ДНК,— 6.

Волосы — еще один природный полимер, родственный белковым молекулам. Сами белки состоят из цепных молекул конечной длины, в которые входят 20 разных аминокислот; строго определенная последовательность аминокислотных звеньев задает форму и роли биологически значимых молекул. Волос состоит из цепочек аминокислот, но спиральные цепи волоса — α-кератин, или α-спирали, — чуть ли не бесконечны. Материал ногтей — β-кератин, или β-лист, — тоже аминокислотные цепи, но уложенные наподобие стопки бумажных листов.

Главный компонент волоса — глицин, самая маленькая аминокислота, но в волосах есть и другие аминокислоты. Стоит отдельно сказать о серосодержащем цистеине, способном связываться с другими цистеинами, так что образуются новые α-кератиновые цепи. Цистеин-цистеиновые мостики, которые вы-

5 Кремнийсодержащий полимер полидиметилсилоксан при своей чрезвычайно низкой температуре стеклования и, следовательно, низкой вязкости при комнатной температуре занимает важное место в нашем быту. Это основа силиконовых герметиков, но тут есть одна маленькая хитрость — концы полимерных цепочек сформированы так, что в присутствии влаги между ними возникают мостиковые связи. Если добавить к силоксану жидкость, начнется вулканизация на воздухе при комнатной температуре с образованием мягкого силоксанового каучука. В ходе реакции выделяется уксусная кислота, основной ингредиент уксуса, — ее запах вы и ощущаете при вулканизации каучука.

6 В дезоксирибонуклеиновой кислоте, ДНК, сополимере природного происхождения, закодирована генетическая информация в виде строго определенной последовательности звеньев-мономеров. Медики, биологи и криминалисты научились воспроизводить этот сополимер в полимеразной цепной реакции (ПЦР). Метод позволяет селективно полимеризовать мономеры ДНК (нуклеиновые кислоты) и копировать фрагменты той или иной цепи ДНК. С помощью ПЦР можно определить конкретные участки ДНК, что нередко используют в судах вместо экспертизы по отпечаткам пальцев.

страиваются в волосах, отвечают за их структуру; благодаря мостиковым связям термопластик превращается в реактопласт. Чем больше дисульфидных мостиков в волосах, тем они жестче и тем более четкая у них структура (рис. 17.3.9). Когда вам в парикмахерской делают перманент, сначала под воздействием химических веществ дисульфидные связи рвутся и волосы переходят в термопластическое состояние, а затем, когда форма волос изменяется, эти связи восстанавливаются. Волос опять превращается в реактопласт, но в заново зафиксированной форме.

## Синтетические полимеры; целлулоид, плексиглас®, нейлон и тефлон®

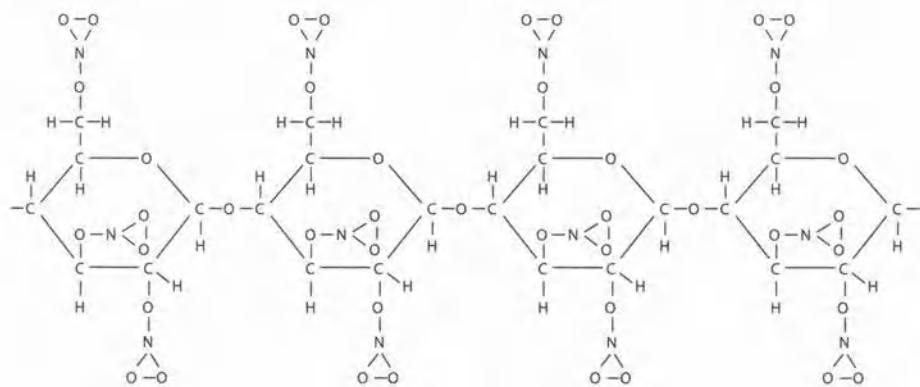
Когда компания *Phelan and Collander* посулила 10 000 долларов тому, кто найдет заменитель слоновой кости для бильярдных шаров, ни целлюлоза, ни каучук не подошли для решения этой задачи. Но братьям Хайат удалось создать новый материал на основе модифицированной целлюлозы (нитроцеллюлозы) (рис. 17.3.10). Это был целлулоид — первый практичный синтетический пластик.

В противоположность целлюлозе, которая не поддается формованию, целлулоид можно размягчить химическим способом (пластификацией) и придать ему любую форму. Из целлулоида делали вещи, очень похожие на те, какими мы пользуемся и сейчас, — прозрачные пластиковые пленки, расчески, игрушки и синтетические шелковые ткани. Но целлулоид уж очень хорошо горит и при долгом воздействии света темнеет. Сама нитроцеллюлоза — это взрывчатое вещество, основной компонент бездымного пороха. Если целлулоидная кинолента перегревалась, проектор мог вспыхнуть.

Химики обнаружили, что вместо нитрования целлюлозы можно присоединить к ней другие функциональные группы и получить нужные, но менее опасные пластики. Первой достойной альтернативой нитроцеллюлозе стала ацетилцеллюлоза. Ацетилцеллюлоза, известная под общим наименованием «ацетат», или «триацетат», по-прежнему широко применяется в разных видах. Кроме того, выяснилось, что можно подвергнуть целлюлозу серии превращений и в конечном итоге прийти к тому, с чего все началось, — регенерированной целлюлозе, или гидратцеллюлозе. Этот химический процесс позволяет придать ей форму волокна или пленки. Примеры гидратцеллюлозы — искусственный шелк и целлофан.

Из полиметилметакрилата делают органическое стекло — плексиглас® и люцит® (рис. 17.3.11). Как и целлюлоза, полиметилметакрилат содержит атомы кислорода и способен образовывать водородные связи между цепочками. Эти связи настолько прочны, что плексиглас являет собой твердое стеклообразное вещество уже при температуре чуть ниже 105 °С. Это твердый, прозрачный и долговечный материал.

При чересчур сильном сгибании плексиглас не ломается, как стекло, а покрывается сетью микротрещин. На растянутой поверхности пластика появляются расщелинки, но туго натянутые молекулярные цепочки не дают им расширяться. Поскольку скорость проходящего сквозь расщелины света меняется, он отражается от растрескавшейся поверхности без всяких закономерностей, что придает потрескавшемуся пластику молочную полупрозрачность. Но плексиглас не ломается. Благодаря ударопрочности плексиглас часто служит безопасным заменителем стекла.



Нитроцеллюлоза, или целлулоид



Рис. 17.3.9. Структура естественных локонов поддерживается дисульфидными мостиками, которые наводятся между цепными молекулами α-кератина в волосах. Мостиковые связи соединяют все цепи в каждом отдельном волосе, превращая его в одну огромную макромолекулу в виде спирали, что вы и видите на фотографии. Если у вас от природы прямые волосы, вы можете сделать себе временную завивку, размягчив волосы с помощью воды и тепла, чтобы изменить их форму. Вода размягчает волосы, вступая в химическое взаимодействие с α-кератином и легко проникая в каждый волосок. Оказавшись внутри волоса, вода выступает в роли пластификатора: под действием этой смазки для молекул волос становится мягким и податливым. Тепло смягчает волосы, увеличивая их тепловую энергию, благодаря чему облегчается относительное смещение молекул. Тепловое размягчение волос требует осторожности: перегрев волос, вы можете их опалить. Однако поменять форму волоса с помощью воды и тепла можно лишь ненадолго, а если вы хотите сохранить локоны, придется использовать химические средства. В процессе перманентной завивки идут химические реакции с разрывом старых дисульфидных связей и образованием новых, что полностью меняет строение молекул.

Рис. 17.3.10. Нитроцеллюлоза образуется в результате реакции целлюлозы и смеси кислот. В отличие от целлюлозы, нитроцеллюлоза поддается формовке — это была первая в мире синтетическая пластмасса. Однако нитроцеллюлоза — вещество горючее и взрывоопасное.



К сожалению, молекулы тефлона легко рвутся, если в их цепях менее 100 000 атомов углерода. При такой длине рептация происходит настолько медленно, что переход в вязкотекучее состояние для тефлона практически невозможен. Даже при температуре плавления 300 °С вязкость его так велика, что он больше похож на твердое вещество. Поэтому, чтобы отлить какое-то изделие из тефлона, форму наполняют тефлоновым порошком и нагревают до тех пор, пока он не сплавится в сплошную массу.

## Жидкокристаллические полимеры; кевлар®

Даже при высоких температурах не все полимеры образуют неупорядоченные клубки. Молекулы некоторых полимеров жесткие, будто уложенные рядом палки, хотя и способны к рептации. Полимеры такого рода в жидком состоянии представляют собой жидкие кристаллы, а в твердом — необычайно прочные волокнистые материалы.

Пример полимерного жидкого кристалла — полипарафенилентерефталамид, он же кевлар®. Молекула этого сополимера напоминает молекулу нейлона, но ее цепь составлена не из углеродных атомов, а из ароматических колец (рис. 17.3.14). Так как кольца не гнутся, цепные молекулы жесткие и прямые.

При комнатной температуре молекулы кевлара образуют длинные, одинаковые кристаллы, чем обусловлен его очень большой предел прочности при растяжении. Его прямым молекулам не надо распутываться и распрямляться, когда вдоль цепей действует растягивающее напряжение. Молекулы сопротивляются напряжению все вместе. Чтобы сломать кевлар, надо сломать сразу все молекулы. Поскольку кевлар и другие жидкокристаллические полимеры почти не поддаются растяжению и их почти невозможно сломать, из них делают пуленепробиваемые жилеты, паруса, парашюты и канаты, а также добавляют их в качестве армирующего компонента в композитные пластмассы повышенной прочности.

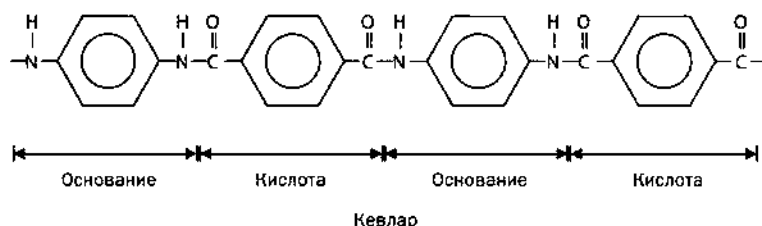


Рис. 17.3.14. Кевлар похож на нейлон, гибкие углеродные цепочки которого заменены на жесткие ароматические кольца. Молекулярные цепи — прямые и негнущиеся, поэтому при высоких температурах этот полимер представляет собой жидкий кристалл. Остывший и затвердевший кевлар превращается в волокнистый материал с очень высоким пределом прочности.

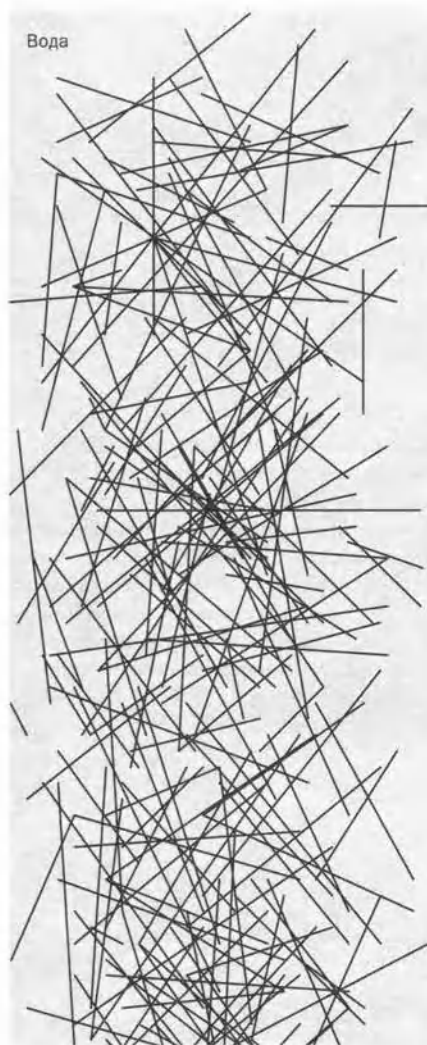
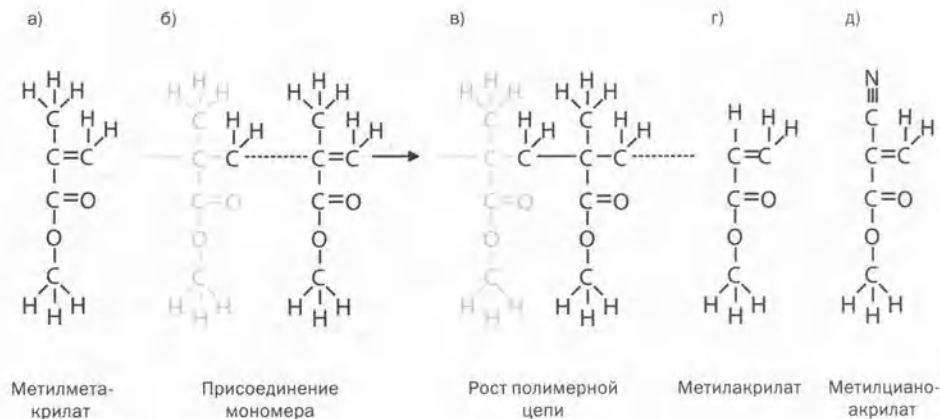
Даже обычный полимер станет прочнее, если распрямить его молекулярные цепи — это часто происходит при формировании волокна. Волокно формируется следующим образом: из узкого литьевого отверстия вытекает тонкая струя жидкости, которая затем остывает и затвердевает. Одни полимеры — например, нейлон — формируют из горячей жидкой массы и отверждают охлаждением. Другие, такие как искусственный шелк, отливают из раствора, затем дают испариться растворителю, и нить застывает. В любом случае синтетические волокна выходят из литьевого отверстия под воздействием растягивающего усилия. Волокно растягивается вдоль, а многие полимерные цепочки расправляются. Затвердевшее волокно сохраняет модифицированную структуру и становится более прочным.

## Полимеризация

Полимеры образуются из мономеров в процессе полимеризации. Процессы полимеризации различаются по химическим особенностям и условиям протекания, но один из них представляет для нас интерес.

Полиметилметакрилат, или плексиглас, является продуктом полимеризации мономеров — молекул метилметакрилата (рис. 17.3.15). В молекуле метилметакрилата имеется двойная ковалентная связь между атомами углерода, по которой легко идет реакция со свободным радикалом — частицей, имеющей неспаренный электрон на одном из атомов. Если добавить к метилметакрилату источник свободных радикалов и нагреть эту смесь, свободный радикал атакует двойную

**Рис. 17.3.15.** (а) Метилметакрилат полимеризуется в присутствии свободных радикалов. (б) Свободные радикалы атакуют двойную связь между двумя атомами углерода и присоединяются к одному из этих атомов. (в) Другой атом углерода сам становится свободным радикалом и начинает искать другой мономер для атаки. Процесс идет до тех пор, пока не образуется длинная цепь. Могут использоваться и другие мономеры — метилакрилат (г) и метилцианоакрилат (д).



**Рис. 17.3.16.** Из желатина, смешанного с водой, получается гель. Молекулы желатина играют роль жестких волокон, как бы сваленных в неупорядоченные кучи. Вода заполняет промежутки между волокнами, а волокна не очень надежно, но удерживают ее в этих просветах.

связь между атомами углерода. Двойная связь станет одинарной, а свободный радикал присоединится к одному из этих атомов углерода. Второй атом углерода сам станет свободным радикалом и будет искать себе пару, с которой он мог бы образовать связь. Вскоре он атакует другую молекулу метилметакрилата, та — следующую и так далее. На каждой стадии длина молекулы увеличивается, и в конце концов образуется полимерная цепь.

Основу большинства клеев составляют полимеры, и многие клеи затвердевают путем полимеризации. Самый простой способ отверждения — выпарить растворитель, но на самом деле при полимеризационном отверждении клеи не сохнут. Вместо этого идет реакция полимеризации и начинает образовываться пластмасса. Цианоакрилатные и эпоксидные клеи, отверждаемые ультрафиолетовым излучением клеи и полиуретановые монтажные пены — все они до отверждения существуют в виде мономеров. Как только клей начинает затвердевать, маленькие молекулы вступают в химическую реакцию и объединяются в длинные цепи и сети.

## Желатин

Желатин — это животный продукт глубокой обработки, который содержит миллиарды длинных и тонких молекул белков. Смешиваясь с водой, он насыщает ее этими крошечными волокнами. По мере охлаждения и формирования студня волокна постепенно слипаются. Они не склеиваются в кластеры, а как бы собираются в щетинистые кучки. Затем образуется прочная разветвленная структура во всем объеме раствора. Вода занимает просветы в объемной сетке молекул (**рис. 17.3.16**). Если не брать воду в избытке, вся ее масса распределится по объему рыхлой структуры. В результате получается мягкое и эластичное “твердое” вещество. Подобный композиционный материал, который представляет собой твердый каркас, заполненный жидкостью или газом, называется гелем.

Сладкое желе — как раз такое квазитвердое вещество. Оно отлично держит форму, хотя и состоит главным образом из воды. Если желе перестоит, из пустот начнет выделяться вода и желе оседет. По этой причине желатин с высоким содержанием влаги не может храниться долго. Поскольку он имеет тенденцию к расслоению, на его поверхности и вокруг него выступает вода. При более высокой доле собственно желатина студень будет крепче и не расслоится.

Если к крахмалу или другим водорастворимым полимерам и волокнам добавить воды, начнется такой же процесс загустевания. Точно так же образуется молекулярная сеть, что приведет к увеличению вязкости жидкой смеси. В кулинарии и в бытовой химии, где важна большая вязкость, часто используются загустители. На вкус и химические свойства продукта они не влияют, но меняют текстуру. Покупая готовый густой молочный коктейль, помните: он такой вязкий не потому, что в нем много питательных ингредиентов, — просто в него добавили химические загустители, чтобы он выглядел более аппетитно.



## ГЛАВА 18

# ПО ЗАКОНАМ ХИМИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

**Н**есмотря на то что химия чаще считается самостоятельной наукой, у нее много общего с физикой. Силы, которые связывают атомы в молекулах, могут быть описаны в терминах физики, и тепловые, статистические, даже электрические свойства химических веществ можно изучать с точки зрения физики. В этой главе пойдет речь о процессах, которые можно считать как химическими, так и физическими или смешанными.

Я всегда любил химию. Еще в пятом классе я воспроизвел не меньше нескольких десятков из пятисот опытов, которые позволял поставить стандартный детский набор химических реактивов и оборудования. Кроме того, у моего отца был потрясающий учебник химии, одна из глав которого была посвящена опасным химическим соединениям. Там подробно рассказывалось о том, чем именно опасно каждое из них и чего нельзя с ними делать. Само собой, когда я с помощью папы отправил заказ в настоящую химическую компанию, в мой перечень вошли почти все эти реактивы, за исключением самых ядовитых или до того нестойких, что ни один нормальный человек их не выслал бы, тем более щестиклашке. Как же я развлекался!

На моей одежде появились странного вида дыры, из нашего подвала доносились экзотические запахи и выходили разноцветные газы, зато я научился относиться с уважением к химии и химической физике. Как говорится, то, что не убивает нас, делает нас сильнее — и я здорово закалился. Мои родители как будто не замечали оранжевых облачков диоксида азота, плавивших над нашим садом, когда я, затаив дыхание, украдкой убежал подальше в горы.

В этой главе, в отличие от предыдущих, мы рассмотрим, казалось бы, абсолютно прозаические, будничные темы, однако для повседневной жизни они крайне важны. Одна из моих любимых — стирка, замечательный пример того, какую роль может играть наука в самом что ни на есть рутинном занятии. Что это — физика или химия? Не все ли равно — главное, что это очень интересная тема, которая охватывает многие вопросы науки.

618 **18.1 Переработка нефти**  
*Как с помощью химических и тепловых процессов нефть превращают в бензин.*

634 **18.2 Стирка**  
*Как химические процессы чистят одежду, не повреждая ткань.*

649 **18.3 Батарейки**  
*Как химические системы накапливают энергию и используют ее для выработки электроэнергии.*

Нефть — один из самых универсальных природных ресурсов. Полтора столетия назад она перестала быть простым заменителем животного и растительного фонарного масла, а также смазочным средством, и превратилась в одну из основ нашей экономики. Помимо того, что нефть служит источником энергии для транспорта, это еще и сырье для многих отраслей химической промышленности. Нефть и нефтепродукты играют такую важную роль в жизни общества, что есть смысл уделить им больше внимания, не ограничиваясь обычным визитом на бензоколонку.

### Что такое нефть?

Для того чтобы разобраться в тонкостях переработки нефти, надо сперва понять, что это за продукт. Нефть — это сложная смесь химических соединений, образовавшихся, как полагают, в результате разложения древних морских организмов. Среди компонентов нефти преобладают углеводороды — молекулы, которые состоят только из атомов углерода и водорода. Однако есть и другие органические вещества, содержащие кислород, азот и серу. Более того, в нефти присутствуют различные соли металлов.

Нефть обнаруживается в пористых горных породах под купольными складками непроницаемых пород. Поскольку плотность нефти меньше плотности воды, она всплывает в воде и оказывается зажатой между водным слоем снизу и непроницаемой горной породой сверху. Иногда над нефтяным слоем под купольной складкой скапливается природный газ. Вода под нефтью соленая — вероятно, она осталась с тех пор, когда в этом месте было море, в котором и обитали разложившиеся впоследствии организмы.

Время и давление сделали нефть такой, какой мы видим ее сейчас, и она скопилась в тех пористых горных породах, где мы ее сейчас находим. Механизм произошедших химических преобразований и миграции нефтяных слоев до сих пор неясен. Но как бы ни было туманно происхождение нефти, она существует в природе, и мы потребляем ее в огромных количествах.

А что представляют собой компоненты нефти? Чтобы ответить на этот вопрос, давайте рассмотрим строение их молекул. Выделим четыре класса углеводородов — парафины (или алканы, насыщенные алифатические углеводороды), олефины, циклопарафины и ароматические углеводороды. В этих и других подобных названиях отражены способы связи атомов углерода друг с другом и с атомами водорода.

Во всех веществах, которые принадлежат к перечисленным классам, атомы соединены ковалентными связями. В простой ковалентной связи два атома делят общую пару электронов, оставаясь на некотором равновесном расстоянии. Пару составляют электроны с разнонаправленными спинами (условно вверх и вниз), а принцип Паули позволяет двум электронам с разными спинами занимать одну и ту же орбиталь. Это электроны и делают — они делокализируются между двумя атомными ядрами так, что общая энергия атомов снижается и для их разъединения необходимо совершить работу.

Энергия уменьшается отчасти из-за электростатических эффектов, отчасти согласно законам квантовой физики. Когда электроны находятся между двумя ядрами, силы притяжения больше, чем силы отталкивания, общая электростатическая потенциальная энергия становится меньше и атомы удерживаются друг подле друга.

Но расширяется и пространство, где могут находиться спаренные электроны, их стоячие волны (орбитали) распространяются уже не на один атом, а на два. Энергия электрона, как и фотона, уменьшается с увеличением длины волны, и, делокализуясь между двумя атомами, электрон получает возможность увеличить длину волны и понизить кинетическую энергию. В целом в ковалентной связи уменьшаются и потенциальная, и кинетическая энергии, что существенно затрудняет разъединение атомов, участвующих в связи.

И в нефтехимии, и в органической химии главная роль отведена углероду. Атом углерода располагает четырьмя валентными электронами, и для заполнения восьмиелектронной оболочки ему нужны еще четыре электрона. Электронная оболочка — это понятие из области квантовой физики; если она полностью завер-

шена, вокруг атома образуется почти равномерная сфера стоячих волн электрона. Заполнение электронной оболочки приводит к минимизации энергии атома и переходу молекулы, в состав которой он входит, в более устойчивое химическое состояние. Чтобы достроить электронную оболочку и достичь стабильности, атом углерода обычно делит свои четыре валентных электрона с четырьмя другими атомами. В итоге образуются четыре пары общих электронов, и оболочка заполняется.

Однако теперь соседствующие атомы уже не могут находиться где угодно. Согласно идее обобществления электронов, электронная оболочка атома углерода может заполниться только в том случае, если общие электронные волны (орбитали) равномерно распределены вокруг атома. Такой равномерности легче всего достичь, если связанные атомы расположены в четырех углах тетраэдра (рис. 18.1.1). Тетраэдр — это правильная пирамида с равносторонним треугольником в основании. При тетраэдрической конфигурации четыре атома находятся на максимально допустимом расстоянии, что позволяет электронам равномерно заполнить электронную оболочку.

Таким образом, ближайшие соседи атома углерода должны занимать правильные позиции. Как правило, ковалентные связи достаточно прочны, если образующие их атомы нужным образом ориентированы относительно друг друга. Характерная геометрия органических молекул обусловлена направленностью ковалентных связей, а свойства нефти во многом зависят от геометрии молекул. Направление ковалентных связей влияет и на функционирование биологических систем, без этого жизнь невозможна. Поскольку в большинстве случаев атомам для завершения электронной оболочки нужны четыре пары электронов, в органических молекулах наиболее распространена тетраэдрическая конфигурация.

Чтобы выяснить, как именно ковалентные связи влияют на свойства нефти, рассмотрим строение четырех упомянутых ранее классов углеводородов. Простейший случай — парафины (алканы), цепные молекулы, в которых углеродный скелет “обвешан” атомами водорода (рис. 18.1.2). Как вы догадываетесь, четыре атома, окружающие каждый из атомов углерода, размещаются в углах тетраэдра. Такая конфигурация задает зигзагообразную форму молекулы парафина. Одни парафины имеют единственную углеродную цепь (рис. 18.1.2, в), молекулы других — более сложные, с различными ответвлениями (рис. 18.1.2, г). Разветвленная структура имеет большое значение для бензина и дизельного топлива.

Атомы углерода в разветвленных молекулах парафина могут располагаться по-разному. Молекула 2,2,4-триметилпентана, показанная на рис. 18.1.2, г, — лишь

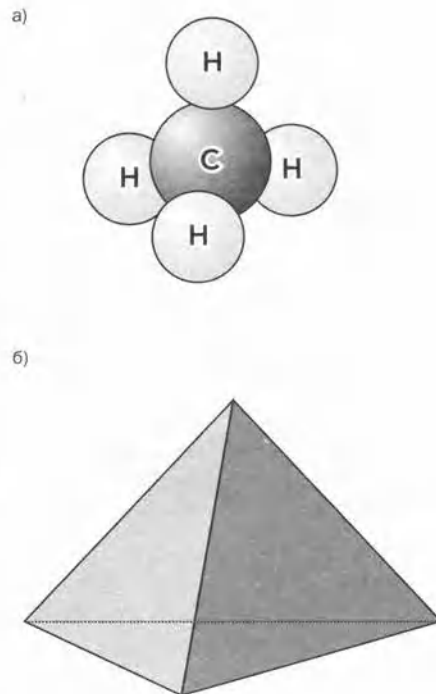


Рис. 18.1.1. Ковалентные связи в органических молекулах имеют направление. Четыре атома водорода, соединенные с атомом углерода (а) располагаются в углах правильного тетраэдра (б).

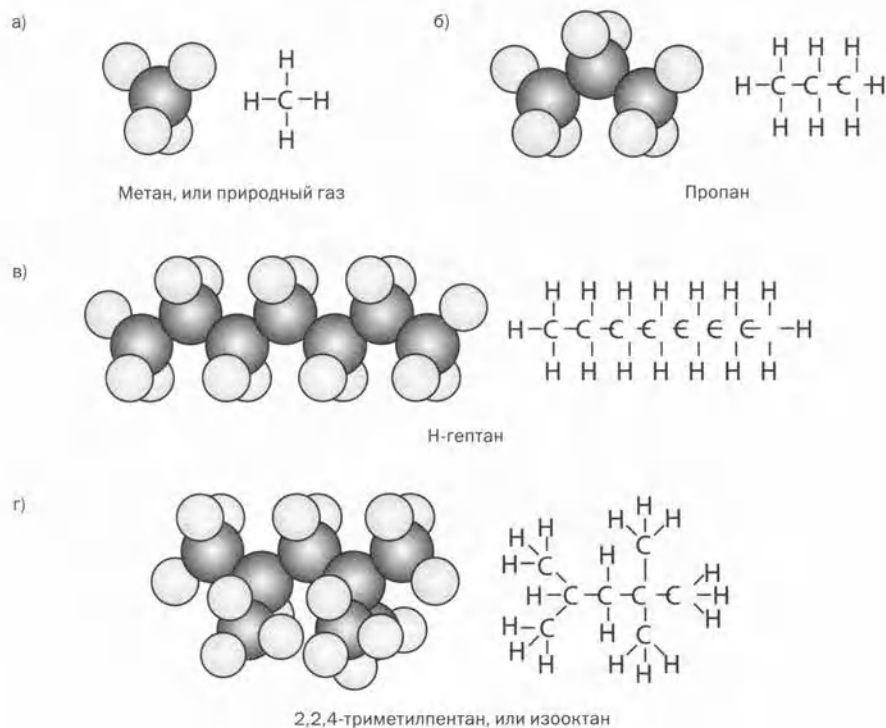
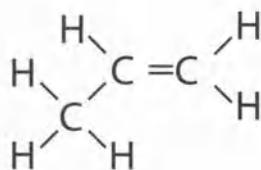
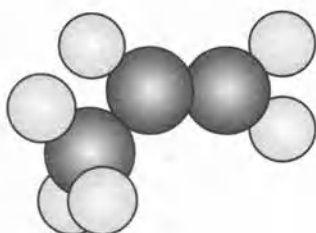
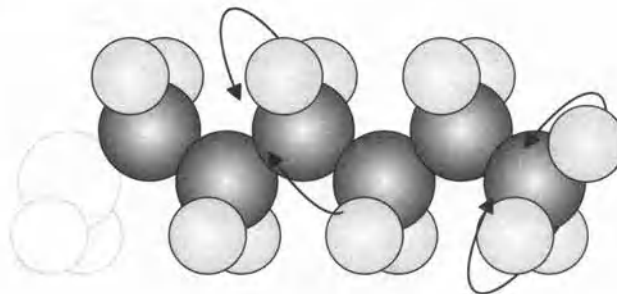


Рис. 18.1.2. Парафины — это углеводороды цепного строения с простыми (одинарными) связями между атомами углерода. Бывают линейные парафины, например метан (а), пропан (б) и гептан (в), и разветвленные, такие как 2,2,4-триметилпентан (г), или изооктан (иногда его называют просто октаном).

**Рис. 18.1.3.** Молекулы парафинов — это жесткие структуры, так как атомы углерода могут вращаться вокруг соединяющей их ковалентной связи. Здесь самый правый атом углерода поворачивается, словно водопроводный кран.



Пропилен (пропен)

**Рис. 18.1.4.** В углеродных цепочках олефинов могут образовываться одна или несколько двойных связей. На рисунке двойной связью соединены два правых атома углеродной цепи пропилена (пропена). Одна пара валентных электронов сосредоточена между атомами углерода, другая делокализована в пространстве перед линией, соединяющей атомы углерода, и за ней.

один из 18 вариантов образования молекулы из 8 атомов углерода и 18 атомов водорода. Две молекулы, составленные из одинакового набора атомов, но отличающиеся по относительному расположению этих атомов, называются изомерами. Разнообразие изомеров, которые входят в состав нефти, поистине огромно.

Хотя изображенные на **рис. 18.1.2** молекулы парафинов явно должны иметь жесткую, упорядоченную структуру, какая-то свобода движений у них остается. Ковалентные связи между каждыми двумя атомами позволяют этим атомам поворачиваться вокруг соединяющей их оси (**рис. 18.1.3**). Атомы в молекуле парафина используют эту возможность. Поэтому молекулы парафинов достаточно подвижны.

Олефины сходны с парафинами, но в их цепях имеются одна и более двойных связей между атомами углерода (**рис. 18.1.4**). Такие атомы делят уже не одну пару электронов, а две изолированные друг от друга пары. Одна из пар заселяет орбиталь, в основном сосредоточенную между атомами углерода, а другая — ту, что располагается по обе стороны от линии, соединяющей атомы.

Согласно принципу Паули, на одной орбитали могут находиться не более двух электронов с противоположно направленными (условно вверх и вниз) спинами. Поскольку ковалентная связь соответствует одной конкретной стоячей волне (орбитали), в ней может участвовать не более одной пары электронов. Первая электронная пара занимает орбиталь (стоячую волну), локализованную между углеродными атомами, которые образуют двойную связь (**рис. 18.1.4**), а другая — ту, что локализуется перед атомами и за ними. Такая расширенная картина электронных волн помогает обоим атомам достроить сферические электронные оболочки, но препятствует их вращению вокруг двойной связи. На **рис. 18.1.4** правая пара углеродных атомов не может вращаться вокруг двойной связи. Молекулы олефинов с их жесткими двойными связями менее подвижны, чем молекулы парафинов.

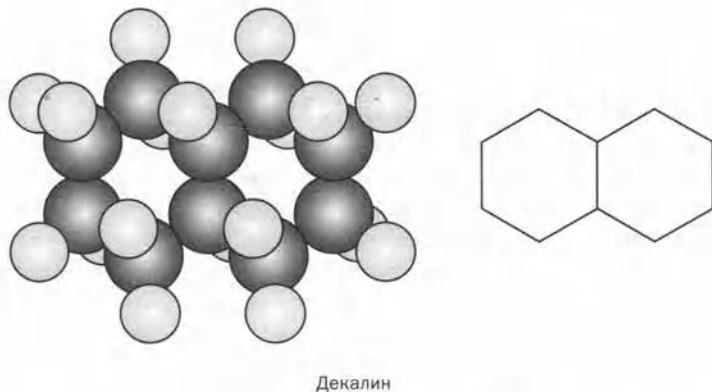
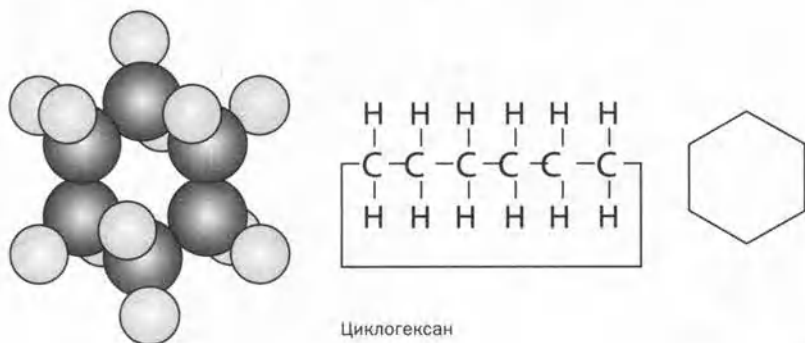
Двойные связи делают молекулы олефинов более подверженными химическим взаимодействиям. Они особенно уязвимы перед атаками свободных радикалов — неполных молекул, один из атомов которых имеет неспаренный электрон на внешней оболочке. Этот одинокий валентный электрон ищет себе пару среди таких же свободных электронов других атомов для создания новой ковалентной связи и завершения внешней оболочки. Самым подходящим напарником для свободного радикала был бы электрон другого свободного радикала, но иногда он атакует электроны ковалентной связи, особенно если эта связь двойная. В результате подобных атак меняются свойства задействованных в реакции соединений.

Свободный радикал атакует двойную связь и захватывает один электрон из второй пары — той, что делокализована вне межатомного пространства. Этот свободный радикал образует новую ковалентную связь с одним из двух атомов углерода. Бывшая двойная связь становится простой, а второй атом углерода остается с неспаренным электроном. Теперь он сам — свободный радикал.

Двойные связи делают молекулу олефина более реакционноспособной, и такие углеводороды стремятся к соединению друг с другом. Если молекулы олефинов в бензине имеют единственную двойную связь, они не мешают работе автомобиля. А вот олефины с двумя и более двойными связями — полиены — могут отложиться в бензобаке клейкими комками, поэтому в автомобильном топливе они лишние. В сырой нефти олефинов не так уж много, но они образуются во время переработки нефти. На завершающих этапах, в частности, удаляют полиеновые углеводороды, чтобы повысить устойчивость бензина к образованию липких кластеров. В двигателе самолета топливо сгорает в разреженной атмосфере на большой высо-

те, поэтому даже обычные олефины с одной двойной связью создают угрозу образования смол. В авиационном топливе олефины не допускаются совсем.

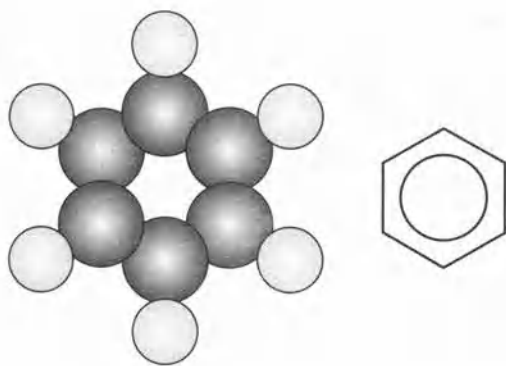
Помимо молекул парафинов с открытой углеродной цепью в нефти содержатся молекулы с замкнутой цепью — циклопарафины. Циклопарафины образуются из-за того, что гибкие углеродные цепи насыщенных углеводородов сворачиваются в кольца и спирали. Если два крайних углеродных атома линейной молекулы углеводорода сблизятся и от них оторвутся два атома водорода, возникнет связь и молекула превратится в циклическую (рис. 18.1.5). Чаще всего встречаются циклические углеводороды с пятью и шестью атомами углерода, но в состав нефти входят циклы с тремя, четырьмя, семью и более атомами. Достаточно распространены и соединения с двумя и более кольцами.



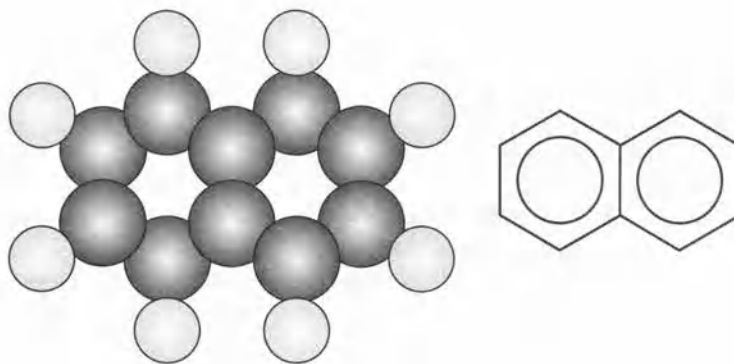
Последнюю крупную группу углеводородов нефти составляют ароматические углеводороды. Структура их молекул включает шестиатомное углеродное кольцо особого типа — ароматическое кольцо. Простейший пример соединения с ароматическим кольцом — бензол (рис. 18.1.6). На долю каждого из двух соседних углеродных атомов в бензольном кольце приходится по полторы пары электронов. Одна электронная пара локализована между двумя атомами углерода — это обычная ковалентная связь. А дополнительные полупары делокализованы по всему кольцу и участвуют в образовании дополнительных полусвязей каждого из двух соседних атомов углерода. На эту связь особого типа каждый атом углерода выделяет по электрону — всего получается шесть электронов. Орбитали шести общих электронов распределены по всему кольцу, над ним и под ним, объединяя таким образом все шесть атомов углерода. Электронам хватает пространства для движения, у них большие длины волн и низкая кинетическая энергия.

Ароматические кольца всегда плоские. Они не имеют тетраэдрических фрагментов структуры, которые придают зигзагообразную геометрию углеродным цепям парафинов и циклопарафинов. Атомы углерода в ароматическом кольце тоже стремятся заполнить свои электронные оболочки, но электроны кольца делокализованы вверху и внизу электронного облака. Из-за этого углеродные атомы не образуют связей с атомами над и под кольцом. Каждый атом углерода соединен с тремя другими атомами, которые размещаются в углах равностороннего треугольника, и таким образом достраивают свои электронные оболочки. Два из

Рис. 18.1.5. Углеродные цепи циклопарафинов замкнуты в кольцо. Атомы углерода последовательно соединены по зигзагообразной схеме, поэтому молекулы не плоские. Обычно углеродное кольцо представляет собой ломаный многоугольник, а в его вершинах располагаются атомы углерода, к которым присоединяется максимально возможное количество атомов водорода.



Бензол



Нафталин

**Рис. 18.1.6.** В ароматической молекуле может быть одно и более шестиатомных углеродных колец. Атомы ароматического кольца связаны полуторными ковалентными связями, где половина связи соответствует шести электронам, делокализованным в кольцевых областях над и под линией, соединяющей атомы кольца. Ароматические кольца принято изображать как шестиугольники с окружностью внутри.

трех — другие углеродные атомы кольца. Третий — обычно атом водорода. Молекулы ароматических углеводородов составлены из равносторонних треугольников, следовательно, они плоские (**рис. 18.1.6**).

В основном молекулы нефти относятся к четырем перечисленным классам углеводородов. Но бывают и соединения смешанного типа. Например, циклические фрагменты могут сочетаться с боковыми цепями, а ароматическое кольцо — с циклопарафиновым. Систематические исследования сырой нефти показали, что в ее состав входят чуть ли не все известные нам углеводороды.

В некоторых компонентах нефти присутствуют атомы кислорода, серы и/или азота. Эти три атома, по-видимому, попали в нефть в процессе ее образования при разложении биоматериала. Именно они вкупе с атомами углерода обеспечивают все разнообразие химических соединений, встречающихся в живой природе. Как и углерод с водородом, кислород, сера и азот соединяются с другими элементами ковалентными связями. Но их атомы ближе к цели, для заполнения электронной оболочки им требуется меньше ковалентных связей, чем атомам углерода.

Атомы кислорода и серы имеют по шесть валентных электронов, и до завершения электронной оболочки им недостает двух электронов. Обычно они образуют две ковалентные связи с соседними атомами, отдавая в общее пользование два электрона и таким образом достраивая восьмиелектронную оболочку. У атомов азота пять валентных электронов — чтобы заполнить электронную оболочку, им требуется еще три. Они образуют три ковалентные связи с соседними атомами, отдавая в общее пользование три электрона и также получая восьмиелектронную оболочку.

В органических молекулах кислород, сера и азот нередко замещают атомы углерода, но с ними соединяется меньшее количество других атомов (**рис. 18.1.7**). В то время как атом углерода способен присоединить четыре атома водорода и образовать молекулу метана, атом азота может связываться только с тремя водородными атомами — как в молекуле аммиака. Кислород и сера образуют связи с двумя атомами водорода — получаются соответственно вода и сероводород, который так противно пахнет тухлыми яйцами.

Для готовых нефтепродуктов кислород, сера и азот — нежелательные заместители углерода в молекулах сырой нефти. Особенно вредна сера, поскольку она обладает резким запахом и вызывает кислотные дожди. Сырая нефть бывает высокосернистой, или корродирующей, и низкосернистой легкой. Кислород, азот и сера удаляются из нефти в процессе гидроочистки — реакции взаимодействия с газообразным водородом.

## Что представляют собой нефтепродукты?

К сожалению, от сырой нефти в первозданном виде мало толку — чтобы она приобрела рыночную ценность, ее надо подвергнуть глубокой обработке. Это делают на нефтеперерабатывающих заводах. Но прежде чем отправиться туда на экскурсию, давайте изучим продукты, которые там производят. Каждый из них включает в себя набор различных соединений, выделенных из сырья и смешанных таким образом, чтобы готовая смесь имела определенные физические и химические свойства.

Начнем с автомобильного топлива. Чтобы получить бензин, на нефтеперерабатывающих предприятиях смешиваются вещества, которые при комнатной температуре должны оставаться жидкими, а при температурах выше 200 °С превращаться в газ, должны легко вспыхивать и полностью сгорать в присутствии достаточного количества воздуха и, наконец, быть устойчивыми к детонации. Как мы помним из раздела 8.2, детонация — это преждевременное вспыхивание топливно-воздушной смеси при сжатии в цилиндре автомобильного двигателя. Совершение работы над топливно-воздушной смесью в такте сжатия приводит к росту его температуры, из-за чего возникает риск преждевременного зажигания еще до подачи искры. Чтобы этого не происходило, состав бензина должен быть точно выверен.

В цистернах лучше хранить жидкий бензин, но в разогретом двигателе топливо должно превратиться в газ и сгореть с пользой. Далекое не все углеводороды удовлетворяют сразу двум этим условиям. Одни углеводороды более летучи и легко переходят в газообразное состояние, другие менее летучи. Летучесть углеводорода определяется размерами его молекул. Углеводороды с маленькими молекулами испаряются лучше, чем крупномолекулярные.

Зависимость летучести от величины молекул объясняется силами Ван-дер-Ваальса, которые отвечают за стабильность жидкого состояния вещества. Эти силы возникают в результате случайных флуктуаций электрического заряда в молекулах. Перемещаясь, электроны в двух ближайших молекулах располагаются так, что молекулы начинают притягиваться друг к другу (рис. 18.1.8). В каждый момент времени две молекулы существуют в виде крошечных диполей, благодаря чему притягиваются. Диполи могут исчезать и вновь образовываться, но тем не менее именно по этой причине молекулы не разлетаются.

Силы Ван-дер-Ваальса определяются размерами и формой молекул. Чем молекулы крупнее, тем больше у них электронов и тем больше они склонны к поляризации. Между крупными молекулами развиваются более значительные силы Ван-дер-Ваальса, чем между мелкими, поэтому при комнатной температуре вещества с маленькими молекулами, вероятно, примут газообразное состояние, а вещества с крупными молекулами скорее окажутся жидкостями или твердыми веществами.

Что касается бензина, силы Ван-дер-Ваальса должны быть достаточно велики для того, чтобы при комнатной температуре он оставался жидким, и достаточно слабы для того, чтобы при температуре примерно 200 °С он почти полностью превратился в газ. Это требование накладывает ограничения на размеры и форму молекул, которые входят в состав бензина. Размер молекул главным образом зависит от количества атомов углерода. Для бензина число атомов в углеродных цепях колеблется от 4 на “коротком” краю диапазона до 12 на “длинном”.

На нефтеперерабатывающих заводах поддерживается точно рассчитанный баланс больших и малых молекул, чтобы бензин обладал нужной летучестью

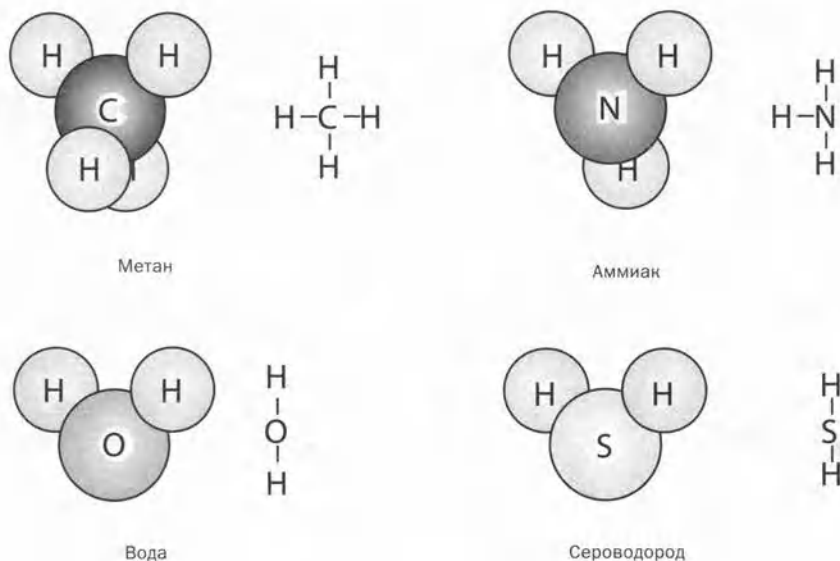


Рис. 18.1.7. Углерод, азот, кислород и сера способны к образованию ковалентных связей. Атом углерода образует четыре ковалентные связи, атом азота — три, атомы кислорода и серы — по две. Соединения этих элементов с водородом — хорошо знакомые нам вещества.

в нормальном интервале рабочих температур. Крупные молекулы сильно притягиваются друг к другу и обеспечивают топливу жидкое состояние при хранении. Мелкие молекулы легко разъединяются, переходя в газовую фазу, и из открытой емкости с бензином быстро улетучиваются. Для того чтобы бензин легко вспыхивал даже в непрогретом двигателе, в его состав включают бутан, в молекулах которого всего 4 атома углерода. Это летучее вещество очень быстро испаряется при хранении бензина. Если машина или бензиновая газонокосилка долго простояли после заправки, они могут и не завестись из-за того, что в баке не осталось бутана.

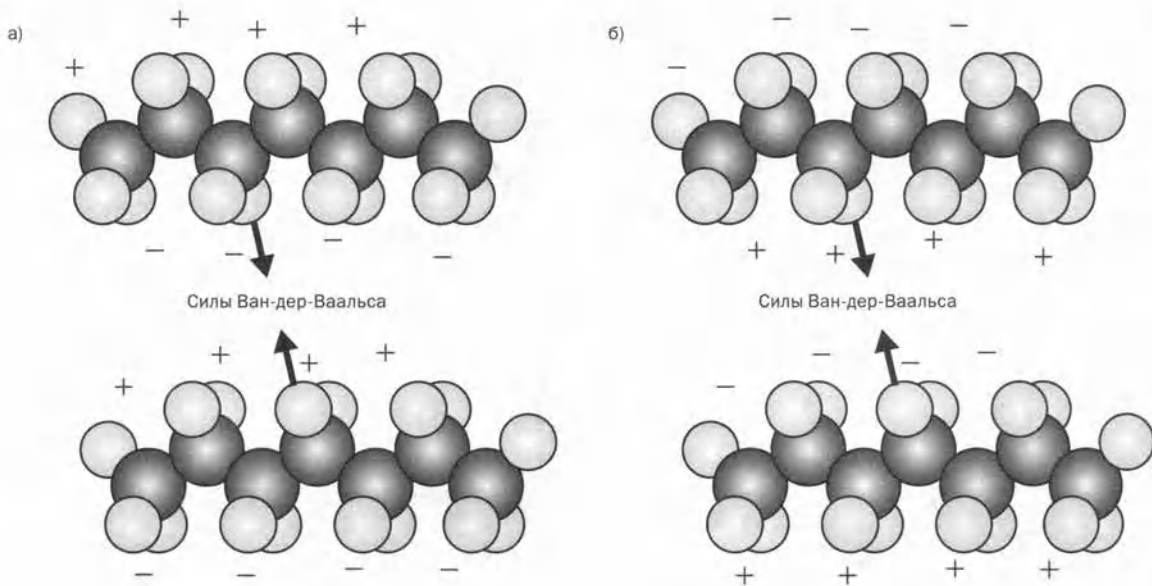
Летучесть бензина зависит от температуры окружающей среды, поэтому на нефтеперерабатывающих заводах состав бензина корректируют с учетом времени года и климата. Зимой надо уменьшить средний размер молекул, чтобы бензин легче испарялся на холоде. Летом включают больше соединений с крупными молекулами, чтобы снизить вероятность нежелательного закипания.

Однако летучесть — не единственный критерий отбора химических соединений для бензина. Есть и еще один — детонационная стойкость. Дело в том, что углеводороды с неразветвленными цепями, которые в основном содержатся в сырой нефти, слишком легко вспыхивают, чтобы быть главным компонентом бензина. А вот углеводороды с разветвленными цепями — парафины, олефины и ароматические — вспыхивают не так быстро.

Устойчивость бензина к детонации характеризуется его октановым числом. Чем выше октановое число, тем менее вероятна детонация. Эталон, относительно которого оцениваются все углеводороды, служит особенно устойчивый к детонации 2,2,4-триметилпентан, иначе изооктан, или условно просто октан, насыщенный углеводород с разветвленной цепью из 8 атомов углерода (рис. 18.1.2, г). Его октановое число принимается за 100. Второй эталон — н-гептан, насыщенный углеводород с неразветвленной цепью из 7 атомов углерода (рис. 18.1.2, в), который детонирует очень легко. Его октановое число принимается за ноль.

Октановое число бензина оценивается относительно этих двух углеводородов и их смесей. Каждый сорт бензина сравнивают со смесями изооктана и н-гептана разного состава до тех пор, пока не будет найден идентичный вариант. Процентное содержание изооктана в смеси, идентичной тому или иному сорту бензина, считается его октановым числом. Например, октановое число бензина, детонационная стойкость которого совпадает с таковой для смеси 90% изооктана и 10% н-гептана, равно 90. Но на октановое число влияют и условия проведения сравнительного эксперимента. Приняты два метода определения октанового числа — исследовательский, отвечающий высокому ускорению при малых оборотах, и моторный, который соответствует нулевому ускорению при высоких оборотах. Для каждого сорта бензина определяют два октановых числа — по исследовательскому методу (ОЧИ) и по моторному (ОЧМ). Среднее двух чисел —  $(\text{ОЧИ} + \text{ОЧМ}) / 2$  — считается октановым числом бензина, которое вы и видите на бензоколонке.

**Рис.18.1.8.** Между двумя ближайшими молекулами углеводорода действуют силы притяжения — силы Ван-дер-Ваальса, которые возникают из-за перераспределения электрического заряда. В один момент времени (а) заряды распределены в молекулах так, что они притягиваются друг к другу с более или менее заметной силой. В следующее мгновение (б) электроны перемещаются, притяжение становится слабее, но все равно есть.





На нефтеперерабатывающем заводе состав бензина подбирается путем смешивания различных углеводородов, так чтобы октановое число составляло примерно 87 для бензина класса "регуляр" и 93 для класса "премиум"\*. Поскольку октановое число говорит только о детонационной стойкости бензина, два сорта с одинаковыми октановыми числами могут иметь совершенно разный состав по углеводородам. Чтобы повысить октановое число бензина, часто добавляют антидетонационные присадки. Эти вещества препятствуют преждевременному самовоспламенению топлива. С этой целью обычно использовали тетраэтилсвинец — до тех пор, пока люди не озаботились проблемой отравления окружающей среды и не отказались от этой добавки. Современные антидетонационные компоненты включают трет-бутиловый спирт и метил-трет-бутиловый эфир.

Керосин менее летуч, чем бензин, в его состав входят молекулы, углеродные цепи которых насчитывают от 10 до 15 атомов. Керосином заправляют бытовые лампы и обогреватели, поэтому он должен хорошо гореть, без копоти и выделения отравляющих газов. Обычно он содержит насыщенные углеводороды неразветвленного строения и циклопарафины. Олефины и ароматические углеводороды горят хуже, да еще коптят. Кроме того, ароматические соединения обычно сильно пахнут.

Дизельное и авиационное топливо, а также мазут схожи по составу с керосином, хотя они менее летучи и содержат больше углеводородов с 12–20 атомами в цепи. В то время как в мазуте допускаются почти любые углеводороды, состав дизельного и авиационного топлива контролируется более тщательно.

В дизельном двигателе жидкое топливо впрыскивается в цилиндр с горячим сжатым воздухом (см. раздел 8.2). Необходимо, чтобы топливо вспыхивало легко само собой и полностью сгорало за короткий промежуток времени. Легкое и быстрое сгорание имеет огромное значение и для реактивного двигателя. Это требование — полная противоположность тому, что требуется от бензинового двигателя. Лучшее дизельное и авиационное топливо составлено из насыщенных углеводородов с неразветвленным углеродным скелетом — таких как *n*-цетан, в цепи которого 16 атомов углерода. Марки дизельного топлива различаются по цетановому числу — показателю эквивалентности топлива легко воспламеняющемуся *n*-цетану и плохо воспламеняющемуся гептаметилнонану, насыщенному углеводороду с разветвленной структурой и теми же 16 атомами в углеродном скелете.

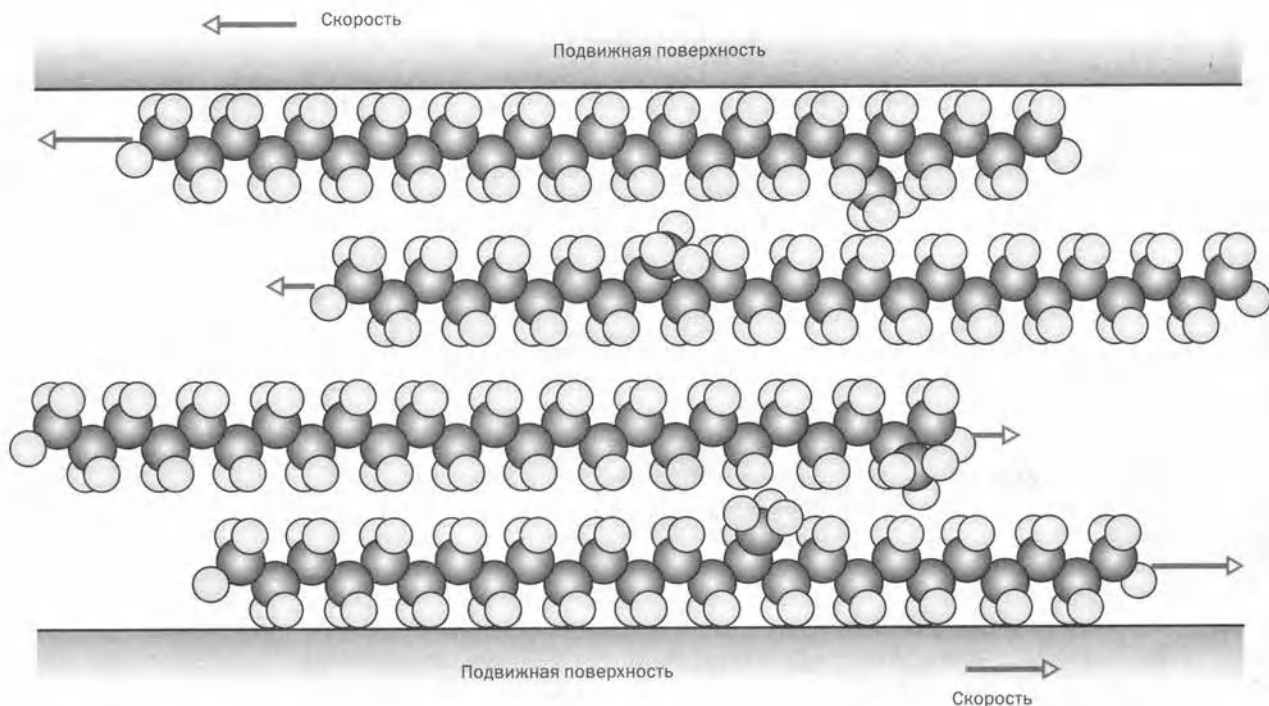
Смазочные масла и воски еще менее летучи, чем дизельное топливо и мазут; они состоят из углеводородов с 20–50 атомами в цепи. Чистые углеводороды с такими большими молекулами при комнатной температуре обычно твердые. Однако состав смазочных масел настолько разнообразен, что их молекулы не способны выстроиться в строго определенном порядке и образовать кристалл. Они не могут подстроиться друг к другу, чтобы сформировать жесткую структуру, поэтому масло остается в виде густой вязкой жидкости.

Только более длинные, неразветвленные молекулы насыщенных углеводородов соединяются друг с другом в кристаллической решетке. Такие твердые вещества называются парафиновыми восками. Воски со временем осаждаются в смазочных маслах, и их, как правило, удаляют. При низких температурах относительно короткие насыщенные углеводороды с неразветвленными цепями тоже выпадают в осадок в смазочных маслах. В охлажденном смазочном масле образуется полутвердое вещество — так называемый петролатум, или нефтяной вазелин.

То, что остается в жидком виде, и есть смазочное масло. Если его нанести на подвижные поверхности, между ними не возникнет трения и в процессе относительного перемещения друг по другу они не будут истираться. Силы Ван-дер-Ваальса притягивают молекулы масла к поверхностям и друг к другу, так что поверхности не соприкасаются. Если внешние силы заставляют обе поверхности сближаться, то возрастающее давление в масле отталкивает их и препятствует контакту.

Масло скользкое потому, что такова природа межмолекулярных взаимодействий. Две молекулы притягиваются силами Ван-дер-Ваальса и прижимаются друг к другу под воздействием давления, которое всегда есть в массе вещества. Но на слишком малом расстоянии молекулы начнут отталкиваться. Это происходит, когда электронные облака (орбитали) двух молекул перекрываются. Принцип Паули запрещает двум идентичным электронам двух молекул находиться на одной орбитали, поэтому эти молекулы держатся на равновесном расстоянии.

\* Здесь приводится классификация, принятая в США. В России в названиях сортов бензина отражено октановое число по ОЧИ. Например, для российского бензина сорта "премиум" (АИ-95) октановое число по ОЧИ составит 95,0, а среднее ОЧИ и ОЧМ — 90. — *Прим. ред.*



**Рис. 18.1.9.** Молекулы смазочного масла притягиваются друг к другу направленными в разные стороны силами Ван-дер-Ваальса и легко перемещаются относительно друг друга. Они препятствуют контакту поверхностей и в значительной степени уменьшают трение между этими поверхностями.

Впрочем, эти силы зависят только от расстояния между молекулами и не мешают их скольжению друг по другу. На самом деле в масле молекулы скользят довольно легко, и именно этой подвижностью объясняются смазочные свойства масла (**рис. 18.1.9**). Относительные перемещения молекул в масле никак не сказываются на силах Ван-дер-Ваальса.

Однако если внешние силы подталкивают поверхности друг к другу, в масле повышается давление. При герметично закрытом контакте поверхностей это не имеет значения. Но обычно граница контакта поверхностей сообщается с внешней средой, где давление ниже. Поскольку жидкость всегда устремляется в область пониженного давления, смазочное масло вытекает наружу. Единственное, что может удержать его от полного вытекания, — это вязкость масла, его сопротивляемость движению в себе самом. Чем выше вязкость масла, тем вероятнее, что оно сохранится между поверхностями и защитит их от износа.

Во многих случаях важно правильно подобрать масло с оптимальной вязкостью. Недостаточно вязкое масло вытечет, и поверхности лишатся защиты. Если вязкость чересчур большая, будет теряться энергия, так как работа против сил вязкого трения перейдет в тепловую энергию.

Вязкость масла в немалой степени зависит от величины молекул. Чем больше молекулы, тем масло более вязкое. Но не менее важны строение молекул и температура. Вязкость некоторых веществ, особенно циклопарафинов и ароматических углеводородов, существенно меняется при изменении температуры. Поскольку от масла, как правило, требуется, чтобы его свойства оставались неизменными при любой температуре, смазочные масла обычно состоят из насыщенных углеводородов (парафинов) с разветвленной цепью (**рис. 18.1.9**).

В моторные масла часто добавляют присадки, чтобы его вязкость при нагревании оставалась прежней. В качестве присадок выбирают вещества с длинными молекулами, которые при низких температурах скатываются в компактные глобулы, а при высоких расправляются. Распрямленные молекулы сгущают масло и помогают ему делать свое дело. При очень высоких температурах и присадки, и само масло разлагаются на вещества с маленькими молекулами и безвозвратно теряют почти всю свою вязкость. Поэтому масло нельзя перегревать.

Углеводороды нефтяного битума имеют самые крупные молекулы среди всех продуктов переработки нефти. Нефтяной битум остается после того, как из сырой нефти извлекли все прочие углеводороды. В его состав входят длинные насыщенные углеводороды или циклические углеводороды с конденсированными

(имеющими общую сторону) кольцами, а также часто присутствуют соединения, в которых помимо углерода и водорода есть и другие атомы. Эту безумную смесь огромных молекул применяют в основном для асфальтирования дорог. Молекулы нефтяного битума настолько велики, что действующие между ними силы Ван-дер-Ваальса не дают им перемещаться уже при комнатной температуре. Плотный, бесструктурный материал намертво приклеивается к поверхностям и служит отличным связующим веществом для гравия и щебня в дорожном покрытии.

Последний из основных продуктов переработки нефти — газы. Составляющие их молекулы углеводородов так малы, что при комнатной температуре и нормальном атмосферном давлении силы Ван-дер-Ваальса не могут удержать их вместе, и они существуют в виде газа. Хотя большей частью эти молекулы образуются в процессе переработки нефти, метан — молекула, которая содержит всего 1 атом углерода (рис. 18.1.2, а), — присутствует в природных подземных месторождениях. Добытый из недр земли метан поступает в трубопровод и продается как природный газ. Природный газ намного легче воздуха, токсичен, не имеет ни цвета, ни запаха. Вдыхать его опасно, так как он не содержит кислорода. Кроме того, метан очень горюч, поэтому к нему добавляют в очень малых количествах сильно пахнущее сернистое вещество, чтобы утечка газа не осталась незамеченной.

Чтобы перевести метан в жидкое состояние, необходимо охладить его до очень низких температур. Из-за этого ограничения природный газ довольно неудобен в хранении. А вот пропан, углеродный скелет которого состоит из трех атомов (рис. 18.1.2, б), становится жидкостью под давлением. Сжиженный пропан хранится в цистернах под давлением и используется для обогрева помещений и приготовления пищи. Сжиженный попутный (нефтяной) газ содержит и пропан, и бутан.

Плотность сжатого пропана достаточно велика, чтобы в емкости сохранялась жидкая фаза. Отдельные молекулы пропана постоянно мигрируют между жидкостью и газом, но в целом соотношение жидкой и газообразной фаз не меняется. Если вы, готовя себе обед, выпустите немного газа из баллона, часть жидкости перейдет в газ и восполнит потерю молекул в газообразной фазе. При такой способности пропана к саморегулированию его очень удобно использовать в быту.

## Очистка нефти от воды и солей

После столь длинной преамбулы пора посмотреть, что происходит на нефтеперерабатывающем заводе. Его задача — разделить разнообразные компоненты сырой нефти так, чтобы получились определенные продукты, например бензин и смазочное масло. К сожалению, поступающая на переработку сырая нефть редко содержит вещества в нужных пропорциях, поэтому сырье приходится обрабатывать. Очистка и переработка нефти — крайне непростое дело, требующее больших затрат и производственных мощностей.

Первым делом надо удалить из сырой нефти воду и соли. Для нефтепереработки эти примеси абсолютно не нужны. Молекулы воды и углеводородов плохо взаимодействуют друг с другом, поэтому не смешиваются — это полезное свойство. Молекулы воды связаны между собой водородными связями, а молекулы углеводородов — только слабыми силами Ван-дер-Ваальса. Если слить вместе два таких жидких вещества, молекулы воды останутся соединенными с другими молекулами воды, а молекулы нефти — с молекулами нефти. Смешать их не удастся.

В конечном итоге именно прочные водородные связи препятствуют взаимодействию воды с нефтью. Чтобы молекулы воды могли смешаться с молекулами нефти, надо затратить слишком много энергии на разрыв водородных связей. Если вы нальете в стакан воду и нефть, менее плотная нефть всплывет, и вы заметите четкую границу раздела двух сред.

Молекулы воды у поверхности раздела отличаются особыми свойствами. Молекулы воды в низлежащих слоях водородные связи вокруг себя во всех направлениях, а над "пограничными" имеются только молекулы нефти. Эти "пограничные" молекулы воды держатся друг за друга особенно прочно, и на поверхности раздела возникают направленные к ее середине силы натяжения. Поверхностное натяжение такого рода всегда наблюдается там, где кончается одна среда и начинается другая. В воде поверхностное натяжение относительно велико, потому что велики межмолекулярные силы взаимодействия.

Действие поверхностного натяжения всегда направлено на сокращение площади поверхности жидкости. Поверхность жидкости подобна эластичной пленке, которая растягивается, если приложить соответствующую силу, но неизбежно сокращается вновь и принимает компактную, гладкую форму. Поверхностное натяжение сжимает капли дождя в крошечные шарики и превращает тихую водную гладь озера в батут для водомерок.

Из-за поверхностного натяжения поверхность раздела между водой и нефтью становится идеально ровной, и ее площадь достигает минимальной величины. Но если вы закроете и хорошенько встряхнете стакан, поверхность раздела уже не будет такой ровной. Стакан заполнится капельками нефти в воде и капельками воды в нефти. Вы создадите эмульсию, взвесь капель одной жидкости в другой.

Поверхностное натяжение быстро сократит площадь капель, для чего придаст им сферическую форму. Но все равно общая площадь поверхности раздела в эмульсии будет больше, чем была до того, как вы встряхнули стакан. Если капля станет меньше, площадь поверхности сократится еще больше, поэтому капельки слипаются и коалесцируют. Каждый раз после слияния двух капель их общая поверхность будет уменьшаться. Рано или поздно все капли объединятся, и вода с нефтью в стакане окажутся полностью разделены.

Но объединить самые мелкие капельки не так уж легко. Продвигаясь в жидкой среде, они испытывают действие больших сил сопротивления, поэтому перемещаются крайне медленно. Им приходится долго искать другие капли, с которыми можно было бы слиться. В густой, клейкой массе нефти мелкие капли воды образуют очень стойкую, чуть ли не вечную эмульсию. В реальности капли воды в нефти окружены разнообразными химическими примесями и просто не могут сблизиться для коалесценции. Все это сильно усложняет процесс удаления воды из нефти.

Чтобы разрушить эмульсию, на нефтеперерабатывающих заводах нефть чаще всего нагревают и пропускают через отстойники или фильтрационные колонны. При повышенной температуре (90–150 °C) поверхность воды сокращается, и каплям легче слиться. На самом деле обладающие высокой энергией молекулы воды так лихорадочно мечутся в разные стороны, что просто не могут удержаться друг подле друга. Чтобы молекулы воды и нефти не переходили в газообразную фазу, надо сохранять в нагретой сырой нефти повышенное давление. Под воздействием тепла уменьшается вязкость нефти, и процесс отстаивания воды идет легче.

Отстаиваясь, вода забирает молекулы соли из нефти. Состоящие из заряженных ионов соли растворяются только в тех жидкостях, которые способны связываться с заряженными частицами. Полярные молекулы воды прекрасно справляются с задачей растворения большинства солей. Молекулы углеводородов неполярны — на их концах не сосредотачивается электрический заряд, — поэтому в углеводородах соли не растворяются. Соли скапливаются в воде и собираются в нижней части отстойника или фильтрационной колонны.

Самым мелким капелькам воды отстояться в нефти труднее. Силы тяжести и архимедовы силы не всегда могут победить силу сопротивления среды. На нефтеперерабатывающих предприятиях для удаления капель воды часто используются электростатические осадители. Поскольку нефть не проводит электричество, она подобна очень плотному воздуху. Введенные в нефть заряженные частицы быстро вступают во взаимодействие с каплями воды, и теперь уже заряженные капли выводятся из нефти электрическим полем.

## Нефтеперегонка

После того как из сырой нефти удалены вода и соли, ее молекулы можно делить на фракции. Основной процесс разделения называется перегонкой, или дистилляцией. В разделе 8.4 уже говорилось о дистилляции воды, но здесь процесс идет несколько иначе. Цель очистки воды — разделить летучее вещество (воду) и нелетучие (соли), и при разумных температурах кроме воды в газообразную фазу ничего не переходит. Но при очистке нефти все молекулы при определенных условиях способны переходить в газообразную фазу. Следовательно, при нефтеперегонке надо создать такие условия, при которых необходимые группы молекул выделяются из общей смеси.

Выходящую из водоотделителя нефть нагревают и подают в нижнюю секцию (куб) высокой ректификационной колонны (рис. 18.1.10). Ректификационная колонна состоит из ряда сборных тарелок, расположенных друг над другом (рис. 18.1.11). Температура в колонне строго контролируется — самая высокая температура поддерживается в кубе, на входе сырой нефти, а по мере продвижения снизу вверх она постепенно понижается. То есть на каждой следующей тарелке температура чуть ниже.

Когда в колонну поступает горячая нефть, все ее молекулы, кроме самых крупных, переходят в паровую фазу. Пар постепенно поднимается по колонне, а его температура понижается (рис. 18.1.10). По мере понижения температуры оказывается, что молекулам нефтяного пара все труднее оставаться изолированными друг от друга. Те, что покрупнее, слипаются и образуют жидкость на тарелках. Часть этой жидкости стекает с верхних тарелок на нижние. В итоге пар поднимается вверх по башне, а жидкость стекает сверху вниз.

На каждой тарелке скапливаются те молекулы, которые при установившейся на ней температуре существуют и в газообразной, и в жидкой фазах. Соединения, которые при данной температуре стремятся перейти в пар, поднимаются на этаж выше. Те же, что при данной температуре стремятся остаться в жидкой фазе, уходят на нижнюю тарелку. Таким образом, на каждой тарелке образуется своя фракция.

Однако чистые химические вещества в результате такого обогащения не выделяются. Жидкость на тарелках — это смесь различных соединений. Несмотря на то, что на определенной тарелке с большей вероятностью накопятся молекулы одного размера, среди них есть как более мелкие, так и более крупные молекулы, которые удержались в жидкой фазе. Природа вообще всегда старается максимально увеличить степень неупорядоченности в жидкости. Одни и те же статистические правила регулируют теплообмен, определяют законы термодинамики и не позволяют полностью очистить химические вещества.

В отличие от нефти и воды, углеводороды хорошо смешиваются друг с другом. Независимо от величины молекул между ними действуют силы Ван-дер-Ваальса. Если вещества беспрепятственно смешиваются друг с другом, говорят, что они растворимы одно в другом. Хотя маленькие молекулы легче переходят в пар, чем большие, с наименьшей вероятностью они останутся и в жидкой фазе.

В ректификационной колонне сырая нефть сначала разделяется на несколько фракций, включая дизельное топливо, керосин и неочищенный (прямогонный) бензин (рис. 18.1.10). Дизельное топливо и керосин в основном готовы для отправки потребителю, а вот прямогонный бензин — еще сырой продукт. У него очень низкое октановое число, и его предстоит еще подвергнуть риформингу и очистке, прежде чем он станет пригоден для заправки автомобиля. Слишком маленькие



Рис. 18.1.10. От входа сырой нефти в ректификационную колонну до верха колонны температура понижается. Соотношение различных молекул в жидких смесях, которые собирают с тарелок на разных уровнях и при разных температурах, соответствует разным нефтепродуктам.

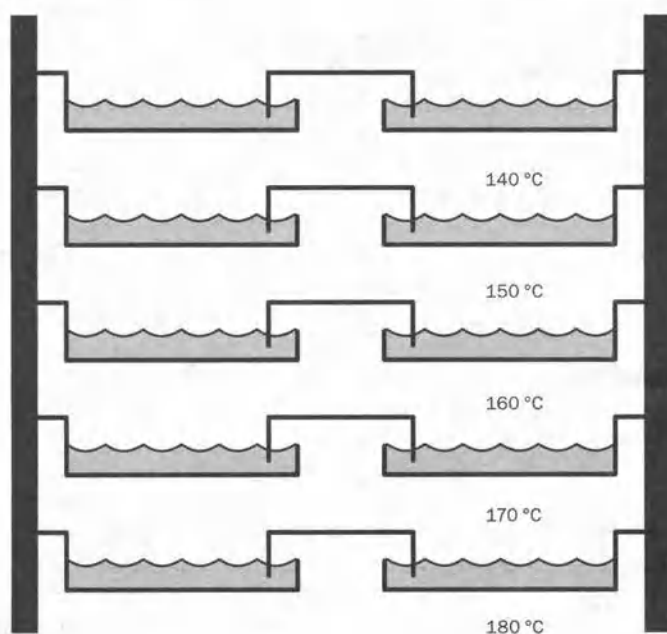


Рис. 18.1.11. Каждая тарелка в ректификационной колонне холоднее той, что ниже нее. Молекулы паров поднимаются из кипящей жидкости с одной тарелки на другую. Более крупные молекулы при этом остаются в конденсате. Состав жидкой фазы на тарелках различен — внизу колонны концентрация крупных молекул выше, чем сверху.



Рис. 18.1.12. При низком давлении в вакуумной ректификационной колонне удается превратить в газ даже малолетучие смазочные масла.

молекулы, которые даже при комнатной температуре не переходят в жидкую фазу на верхних тарелках, образуют фракции пропана и сжиженного нефтяного газа.

Самые крупные молекулы, которые попадают в нижнюю часть ректификационной колонны и при температурах ниже 300 °C едва ли перейдут в пар, остаются в жидкости, стекающей на самую нижнюю тарелку. Казалось бы, имеет смысл снова сильнее нагреть кубовый остаток, чтобы разделить компоненты. Но загвоздка в том, что при 360 °C и выше молекулы углеводородов разлагаются на фрагменты — происходит так называемый крекинг. Затем эти фрагменты рекомбинируют с образованием смол, которые оседают на оборудовании. Чтобы до крекинга не дошло, нельзя допускать слишком сильного повышения температуры.

Компоненты кубового остатка можно разделить путем перегонки, но только при очень низком давлении в вакуумной ректификационной колонне (рис. 18.1.12). Кубовая жидкость из атмосферной колонны вновь нагревается до 350 °C и подается в нижнюю секцию вакуумной колонны. Пар поднимается вверх, а жидкость стекает вниз, и на каждой тарелке накапливаются те молекулы, которые при данной температуре способны распределяться между газообразной и жидкой фазами.

Поскольку в вакуумной колонне давление и плотность паров меньше обычного, в газообразную фазу могут переходить молекулы не очень летучих веществ. Разреженный газ низкого давления, состоящий из молекул смазочного масла, образуется гораздо легче, чем плотный газ высокого давления такого же состава, поэтому процесс идет при гораздо более низкой температуре. Стало быть, в вакуумной ректификационной колонне можно выделить фракции различных смазочных масел и совсем уж нелетучих восков (парафинов). В кубе вакуумной колонны остается нефтяной битум.

Углеводородные газы, которые достигают верха атмосферной ректификационной колонны, еще надо разделить на фракции соответственно размерам молекул. Как правило, это делают путем перегонки, но на этот раз при повышенном давлении и относительно низких температурах. Когда молекулы газа вынужденно приближаются друг к другу, они образуют жидкую фазу, из которой часть молекул поднимается вверх в виде газа, а часть стекает вниз в виде жидкости. На нижних тарелках колонны высокого давления скапливается жидкий бутан, ближе к середине колонны — жидкий пропан, а этан и метан поднимаются на самый верх.

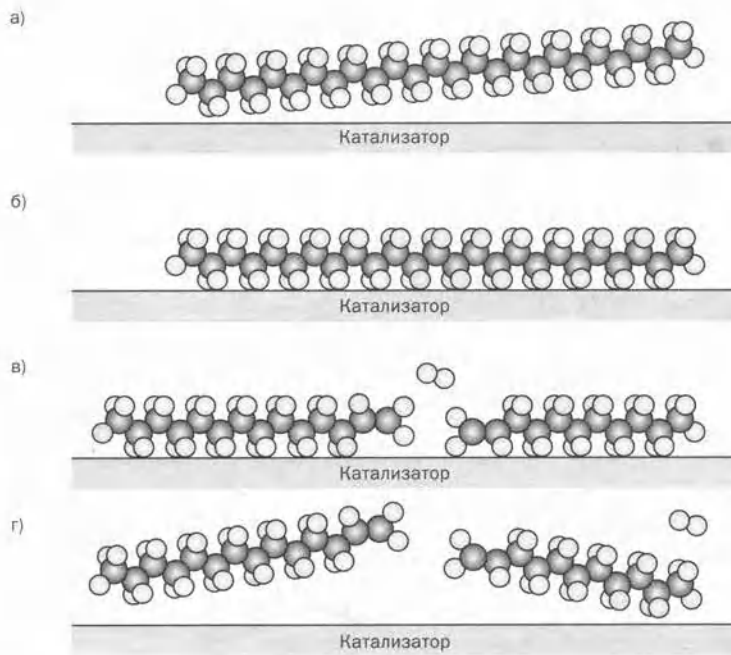
Перевести этан и метан в жидкое состояние можно лишь при низкой температуре, поэтому эти два вещества разделяются в процессе криогенной дистилляции. Этан играет большую роль в химической промышленности, и его обычно отделяют от метана.

## Термический и каталитический крекинг

Однако нефтеперерабатывающее предприятие, как правило, не может позволить себе ограничиться простой сортировкой молекул. Главная задача такого завода — производство транспортного топлива, в то время как рынок всех прочих компонентов сырой нефти сравнительно мал. Но для транспортного топлива пригодно меньше половины веществ, из которых состоит нефть. Более того, не имеющие спроса продукты нельзя хранить вечно. Хотя на нефтеперерабатывающих заводах невостребованные фракции частично сжигаются в целях самообеспечения энергией, все остальное необходимо продать, чтобы освободить место для приемки сырой нефти. Поэтому на интегрированных производствах есть цеха, где ненужные компоненты нефти превращают в товар, который можно продать.

Поначалу маленькие молекулы получали из больших путем термического крекинга. При температуре выше 360 °C молекулы углеводородов распадаются на фрагменты. В этом случае неупорядоченная тепловая энергия углеводородной молекулы может увеличиться настолько, что молекула разрывается на два части. Недолго прожив в виде свободных радикалов, эти части вновь объединяются в химически стабильные молекулы. Новые молекулы, как правило, меньше исходных.

Чем выше температура, тем чаще происходят подобные метаморфозы и тем быстрее идет крекинг нефти. Если при дистилляции термический крекинг — это нежелательный побочный процесс, то контролируемые реакции на крекинговых установках приносят колоссальную пользу. Крупные молекулы, которые в бензине не допускаются, расщепляются на более мелкие, подходящие.



**Рис. 18.1.13.** Катализатор предоставляет поверхность особого рода (а), на которой адсорбируются длинные неразветвленные молекулы насыщенных углеводородов (б). Катализатор способствует расщеплению молекулы на две части (в) — в результате у крайних углеродных атомов вновь образовавшихся фрагментов замыкаются двойные связи и выделяется молекула водорода. Как только перестановка завершится, новые молекулы уходят с поверхности катализатора и он принимает прежний вид (г).

К тому же среди продуктов термического крекинга много олефинов с более высоким октановым числом, чем у обычных компонентов нефти. Они образуются, когда в радикальных остатках первичных углеводородных молекул замыкаются двойные связи. Если крайний атом углеводородной цепи связан только с тремя другими атомами, он может достроить свою электронную оболочку, образовав двойную связь с ближайшим атомом углерода. При такой перестановке второй атом углерода вынужден отдать один атом водорода, который немедленно становится половинкой молекулы водорода. Таким образом, продуктами термического крекинга являются различные мелкие молекулы с двойными связями между крайними атомами цепи и молекулярный водород.

Однако термический крекинг трудно поддается контролю и порождает массу больших, бесполезных молекул. Как правило, чем выше температура в установке крекинга, тем выше октановое число производимого бензина и тем ниже производительность. Чтобы путем термического крекинга получить бензин категории "премиум", на нефтеперерабатывающем предприятии придется выбросить чуть ли не 20% всех углеводородов, которые поступят на установку. Поскольку потери слишком велики, термический крекинг практически полностью вытеснили каталитический крекинг и риформинг.

В этих реакциях горячие углеводороды вступают в контакт с алюмосиликатным катализатором. Этот катализатор, как и все прочие, стимулирует химическую реакцию за счет уменьшения энергии активации, необходимой для осуществления превращения. Катализатор способствует перестройке прикрепившейся к нему молекулы углеводорода (рис. 18.1.13). Катализатор снижает потенциальную энергию частично перестроившейся молекулы, так что для завершения перестройки требуется в целом меньше энергии. То есть каталитическая перегруппировка идет при более низкой температуре.

Катализатор также помогает контролировать перегруппировку молекул. На определенном катализаторе рекомбинация с большей вероятностью пойдет по определенному пути. Катализ особенно полезен для расщепления крупных молекул на мелкие, поэтому для производства бензина каталитический процесс более эффективен.

Поскольку все реакции происходят только на поверхности катализатора, промышленные катализаторы должны иметь хорошо развитую поверхность. Алюмосиликатные катализаторы для каталитического крекинга — это мелкие частицы пористого материала. При диаметре всего лишь 50 микрон они кружатся в едином вихре, в потоке вещества, которое подвергается крекингу.

Реакция завершается за считанные секунды, после чего надо отделить частицы катализатора от жидких продуктов. Смесь пропускают через центробежный

сепаратор, где она вращается с огромной скоростью. Под действием ускорения более плотные частицы катализатора отлетают к наружным стенкам, а чистую жидкость сливают из средней части центрифуги.

К сожалению, на частицах катализатора быстро нарастает слой очень крупных молекул, которые и в реакцию не вступают, и удаляются с трудом. При значительном загрязнении поверхности катализатор, как правило, становится неактивным. Единственный эффективный способ очистить поверхность от налипших частиц — это обжечь катализатор вместе с ними. Именно так и делают на нефтеперерабатывающих заводах. Регенерированный после обжига катализатор вновь готов к погружению в жидкие углеводороды.

## Повышение качества нефтепродуктов

Катализаторы помогают еще и поменять структуру отдельных углеводородов — такой процесс называется реакцией полимеризации. Длинные неразветвленные парафины и циклопарафины вызывают детонацию и в бензине не нужны. Катализаторы изомеризации — обычно платиновые — позволяют так перестроить углеродный скелет, чтобы прямая цепь стала сложной разветвленной (**рис. 18.1.14**). Катализаторы риформинга, чаще всего платиновые и ренийевые, способствуют превращению циклопарафинов в ароматические углеводороды. В обоих случаях значительно возрастает октановое число. Для повышения октанового числа основная масса низкооктанового прямогонного бензина, который отбирается из первой ректификационной колонны, проходит через установки каталитической изомеризации и риформинга.

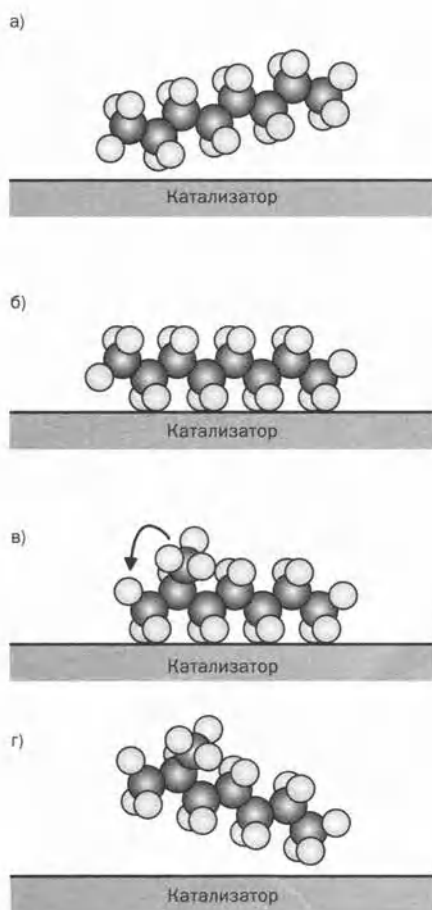
Цель изомеризации — сделать молекулу парафина более сложной за счет взаимной перестановки атомов водорода и углерода. На поверхности катализатора изомеризации один атом углерода и один атом водорода на время отщепляются от молекулы углеводорода и меняются местами. Несколько подобных перестроений превращают исходную молекулу в разветвленный углеводород с высоким октановым числом.

Без катализатора такой процесс потребовал бы огромных затрат энергии. Необходимо разорвать две изолированные ковалентные связи так, чтобы образовались свободные радикалы. Затем атомы углерода и водорода должны поменяться местами и восстановить новые связи с основной молекулой. Даже при высоких температурах вероятность такой сложной перегруппировки мала.

Катализатор изомеризации облегчает процесс благодаря образованию временных связей с молекулой и ее фрагментами. При этом различные фрагменты не проходят стадию свободных радикалов. Они мигрируют по поверхности катализатора и в конце концов воссоединяются друг с другом, так и не обретая свободы. Кроме того, катализатор помогает им расположиться поближе друг к другу, чтобы поменяться местами. Сценарий, который при других условиях вряд ли мог бы реализоваться, становится вполне возможным.

Катализатор риформинга способствует выделению атомов водорода из циклопарафинов и превращению последних в ароматические углеводороды (**рис. 18.1.15**). У ароматических углеводородов октановое число выше, чем у циклопарафинов, поэтому риформинг играет важную роль в производстве бензина. Несмотря на то, что на катализаторе атомам водорода легче оторваться и образовать молекулу водорода, химическая потенциальная энергия продуктов реакции выше, чем у исходных соединений. Поскольку значительная часть тепловой энергии в этом процессе переходит в химическую потенциальную энергию, для поддержания реакции необходимо подводить тепло.

Помимо изомеризации и риформинга, на нефтеперерабатывающих предприятиях проводится и каталитическое присоединение мелких молекул с образованием более крупных. Необходимые компоненты бензина образуются из маленьких молекул в реакциях каталитического алкилирования и полимеризации, которые без катализатора не пошли бы. Исходные вещества в обоих процессах — олефины, образующиеся в результате термического и каталитического крекинга. Двойные связи молекул олефинов обладают высокой реакционной способностью, а катализатор стимулирует присоединение олефинов друг к другу и к прочим молекулам. Так получается бензин с высоким октановым числом, содержащий разветвленные углеводороды.



**Рис. 18.1.14.** Молекула парафина с прямой цепью (а) адсорбируется на поверхности катализатора изомеризации (б). Катализатор стабилизирует промежуточные частицы в ходе реакции, тем самым помогая атомам углерода и водорода поменяться местами (в). Разветвленная молекула парафина уходит, а катализатор возвращается в первоначальное состояние (г).



## Типы химической связи

В молекулах, то есть в веществах, атомы соединены химическими связями. Когда говорят, что между двумя атомами образовалась химическая связь, имеется в виду, что для полного разделения этих атомов необходимо откуда-то подвести энергию. Существует четыре типа химической связи — ковалентная, ионная, металлическая и водородная. Кроме того, между атомами и молекулами могут возникать слабые взаимодействия, связанные с притяжением частиц друг к другу, — силы Ван-дер-Ваальса.

Ковалентная связь образуется между двумя атомами, которые делят общую пару электронов. При таком обобществлении электростатическая потенциальная энергия атомов, обусловленная зарядами, уменьшается благодаря тому, что между положительно заряженными ядрами концентрируется дополнительный отрицательный заряд. Понижается и кинетическая энергия общих электронов, чьи стоячие волны теперь распределены на два атома. Как и все частицы во Вселенной, электроны перемещаются в форме квантово-механических волн, а если волна расплозается, ее длина увеличивается. Возрастание длины волны электрона, как и длины волны фотона, приводит к уменьшению кинетической энергии.

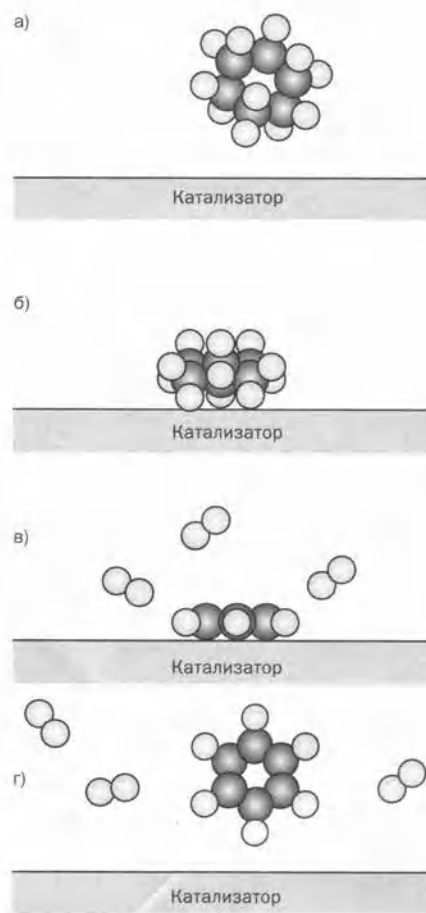
Ковалентные связи имеют четко выраженную ориентацию. Образуют ковалентные связи, атомы углерода, кислорода, водорода и азота выстраиваются почти как в упорядоченной кристаллической структуре. Жесткость ковалентных связей придает определенную форму большинству органических молекул и позволяет им выполнять различные сложные функции в процессе образования биологических систем.

Если атомы в молекуле приобретают противоположные заряды и начинают притягиваться друг к другу, возникает ионная связь. Например, при соединении атомов натрия и хлора последний оттягивает от первого один электрон, в результате чего получается смесь отрицательно заряженных ионов хлора и положительно заряженных ионов натрия. Затем ионы, носители разных зарядов, выстраиваются в аккуратные ряды и колонны, так что каждый ион натрия занимает наиболее близкую позицию по отношению к нескольким ионам хлора, а каждый ион хлора оказывается приближен к нескольким ионам натрия. Ионы соединяются в ионный кристалл — соль, и для того чтобы их разъединить, потребуются затраты энергии. Ионные связи, которые отвечают за кристаллическую структуру, ориентированы, так как прочность их наиболее велика, если расстояние между одноименными зарядами достаточно велико, а между противоположными мало.

Металлическая связь формируется при делокализации электронов между бесчисленным множеством атомов. Она возможна только в металлах, где электроны полностью обобществлены и свободно мигрируют по всей массе материала. Кинетическая и потенциальная энергии общих электронов понижаются, а атомы оказываются связанными. Поскольку относительное расположение атомов мало влияет на металлическую связь, она не ориентирована, и кристаллы металлов относительно легко деформируются.

Водородная связь образуется, когда атом водорода, доступный для контакта (наружный в структуре молекулы), приближается к неподеленной паре электронов какого-нибудь другого атома. Если водород соединен ковалентной связью с атомом, способным удерживать около себя электроны, в частности с кислородом, то этот атом оттягивает электрон от водорода, превращая его в положительно заряженный, готовый к взаимодействию протон. И если такой протон окажется рядом с парой электронов, которые занимают несвязанную орбиталь атома кислорода, он притянется к этой паре. Между атомом водорода и атомом кислорода, предоставляющим свою лишнюю электронную пару, возникнет водородная связь, и для того чтобы вновь разъединить водород и кислород, придется затратить энергию.

И наконец, между любыми двумя соседними атомами и молекулами действуют силы Ван-дер-Ваальса. Они возникают из-за того, что положительные и отрицательные заряды в атоме и молекуле могут перераспределяться, и частица становится поляризованной. Сближаясь, две частицы поляризуют друг друга в результате сложных квантово-механических процессов, и между ними возникают слабые силы, которые тем не менее очень важны. Эти силы достаточно велики для того, чтобы расстояние между молекулами было небольшим и чтобы при достаточно низкой температуре могла образоваться жидкость.



**Рис. 18.1.15.** Циклопарафин (а) садится на поверхность катализатора риформинга (б). Катализатор облегчает выделение молекул водорода из кольца (в) и образование ароматического цикла. Ароматический углеводород уходит с поверхности катализатора, а сам катализатор никак не меняется (г).

Можно стирать белье дома, можно сдавать в прачечную — в любом случае оно должно снова стать чистым и свежим на вид и на ощупь, как новенькое. Мы хотим, чтобы пыль, грязь, жирные пятна и следы пота исчезли, а ткань не испортилась и не полиняла. Более того, одежда должна сохранить форму и размеры, а материя — свою текстуру. При столь многих требованиях неудивительно, что средства для стирки часто рекламируются как чудодейственные.

Чтобы достичь всех поставленных целей, надо найти тонкое компромиссное решение. По химическим свойствам грязь на одежде мало чем отличается от тех веществ, которые придают ткани фактуру и цвет. Удалить одно соединение, не затронув другие, — задача не из легких, и в XIX веке стирка едва ли шла на пользу вещам. Однако в последние годы такое нехитрое дело, как стирка, превратилось в высокотехнологичное действие. Обещанные продавцами стиральных порошков чудеса почти стали явью. В этом разделе мы изучим физические и химические основы процессов, которые помогают осуществить мечту.

### Мыло

Одна из самых трудноразрешимых проблем в стирке — удаление всех загрязнений одновременно. Одни пятна образованы полярными молекулами, в которых есть зоны концентрации электрического заряда, другие — неполярными, электрически нейтральными по всей структуре. Эти два вида загрязнений столь разительно отличаются друг от друга, что жидкость, растворяющая одно из них, вряд ли растворит другое. Хуже того, бывает и такая грязь, которая вообще ни в чем не растворяется — по крайней мере, ни в чем, что вы рискнули бы нанести на одежду. Удалить все виды загрязнений, не повредив вещи, — это и есть главная задача стирки.

Полярные молекулы загрязнений — это в основном соли пота и уличная пыль. Обычно они растворяются в воде с образованием ионов, которые уносятся в оболочке из молекул воды. Таким веществам очень хорошо в воде, поэтому их называют гидрофильными, любящими воду. Поскольку углеводы, например сахар, имеют заряженные зоны и образуют с водой водородные связи, они отлично растворяются в воде, то есть проявляют гидрофильные свойства.

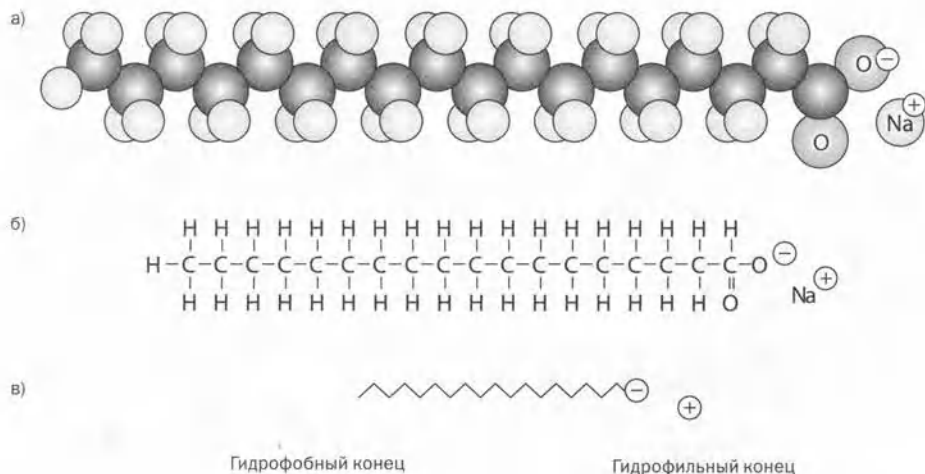
Неполярные молекулы загрязнений — это, как правило, масла, жиры и воски, которые берутся с кожи, из пищи и растений. Жирные молекулы хорошо смешиваются с неполярными растворителями, такими как бензин и керосин. Они не образуют с водой водородных связей, не смешиваются с ней и практически в ней нерастворимы. Неполярные загрязнения называют гидрофобными — они не любят воду.

Можно было бы сначала выстирать одежду в воде, чтобы растворить и смыть гидрофильную грязь, а потом отстирать гидрофобную в бензине. Но это займет много времени и испортит одежду. Не исключено, что в итоге ткань заметно истреплется, а пятна так и останутся на месте. Поэтому мы используем во время стирки мыло, порошки, отбеливатели и кондиционеры.

Мыло — это соль особого рода. Как и все соли, мыло содержит положительно и отрицательно заряженные ионы (рис. 18.2.1). Положительные — самые обычные, чаще всего натрий и калий, лишившиеся одного электрона. Особые свойства и эффективность при стирке мылу придают отрицательно заряженные ионы. Заряд в отрицательных ионах мыла сосредоточен на одном конце очень длинной молекулы. Другой конец — незаряженная углеводородная цепь вроде тех, из которых состоят многочисленные молекулы нефти.

Два конца длинного отрицательного иона играют совершенно разные роли. Тот конец, на котором сосредоточен заряд, — полярный и гидрофильный. Молекулы воды притягиваются к нему и пытаются увести его в раствор. А углеводородная часть мыльной молекулы — неполярная и гидрофобная. Она выталкивается водой, зато хорошо связывается с молекулами масла.

Ион мыла имеет двойное гражданство. Его гидрофильный конец тянется к воде, а гидрофобный — к маслу. Двойственный характер вынуждает ионы мыла накапливаться на границе раздела воды и масла (рис. 18.2.2). Отрицательные



**Рис. 18.2.1.** Мыло — это соль особого рода. Ее отрицательный ион представляет собой длинную гидрофобную (не любящую воду) углеводородную цепь, связанную с гидрофильной (любящей воду) карбоксильной группой. Молекулу мыла можно изобразить составленной из шариков (а), букв (б) и в виде зигзагообразной углеводородной цепи с зарядами (в).

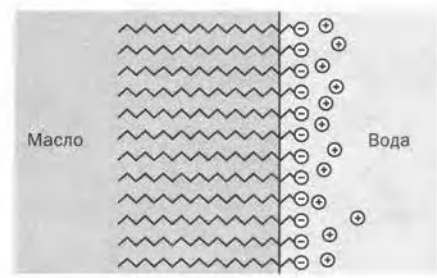
ионы сами собой выстраиваются на границе раздела так, что их заряженные концы оказывают в воде, а углеводородные — в масле. Положительные ионы просто плавают в воде рядом с границей раздела и обеспечивают общую нейтральность.

Стремление ионов мыла выстроиться определенным образом на границе раздела — яркий пример самоорганизации. В то время как раствор поваренной соли в воде неупорядочен и однороден, раствор мыла в воде — совсем другое дело. Даже в отсутствие масла ионы мыла мигрируют к поверхности воды, потому что каждый его ион сам по себе не очень хорошо взаимодействует с водой. Поскольку молекулы воды плохо связываются с неполярными углеводородными цепями, ионы мыла выталкиваются к поверхности воды.

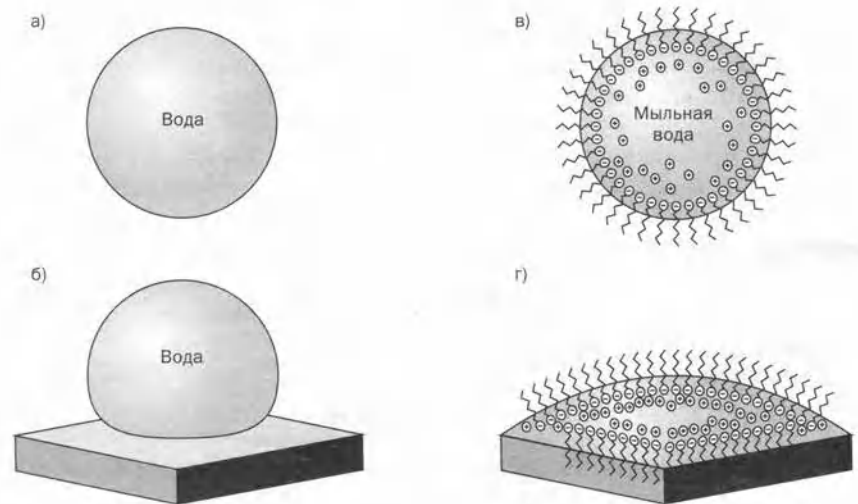
Достаточно добавить в таз с водой чуть-чуть мыла, и на поверхности воды возникает тончайший — толщиной всего в одну молекулу — слой ионов мыла. Мыльные ионы ориентированы так, чтобы их полярные головки были обращены в массу воды, а неполярные хвосты — в воздух. Самые верхние молекулы воды образуют водородные связи с находящимися над ними ионами мыла и уже не так сильно притягиваются друг к другу, как если бы выше был только воздух. Следовательно, молекулы воды принимают незначительное участие в поверхностном натяжении.

Теперь верхний слой жидкости образован углеводородными цепями мыла. Не имея ничего над собой, с чем можно было бы связаться, они взаимодействуют друг с другом и создают поверхностное натяжение. Однако их объединяют не водородные связи, а силы Ван-дер-Ваальса, поэтому доля углеводородных фрагментов в поверхностном натяжении составляет всего 30% вклада воды. Добавление в воду мыла существенно ослабляет поверхностное натяжение.

Ослабление поверхностного натяжения — это первый вклад мыла в процесс стирки. Чистая вода собирается каплями на поверхности, которая не может прочно соединиться с ее молекулами (**рис. 18.2.3, а, б**). Поверхностное натяжение

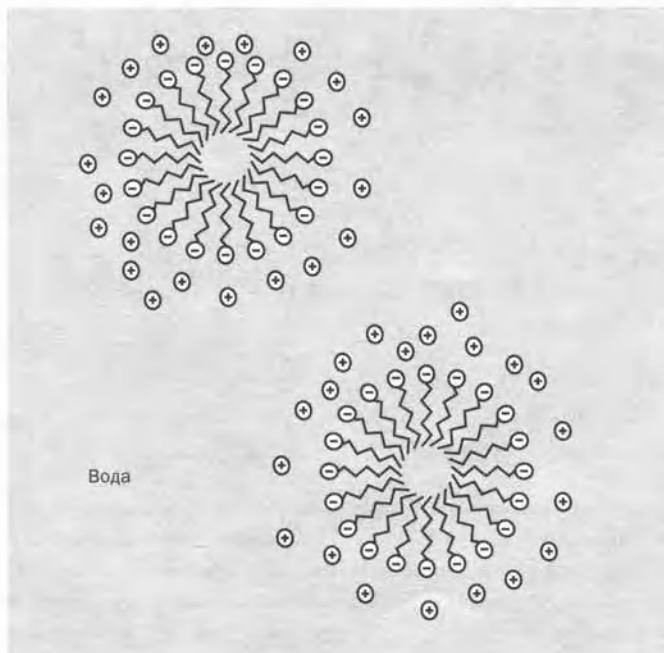


**Рис. 18.2.2.** Отрицательные ионы мыла самопроизвольно перемещаются к границе раздела между водой и маслом. Их гидрофобные хвосты погружены в масло, а гидрофильные головки — в воду.



**Рис. 18.2.3.** (а) Под действием поверхностного натяжения капли чистой воды принимают сферическую форму. (б) На поверхности многих веществ капли воды остаются почти круглыми. (в) Ионы мыла окружают водяную каплю и сильно ослабляют поверхностное натяжение. (г) Мыльная капля лучше растекается по поверхности и эффективно смачивает материал.

**Рис. 18.2.4.** Отрицательно заряженные ионы мыла образуют в воде мицеллы. Гидрофобные хвосты формируют середину мицеллы и стремятся собрать молекулы жирных загрязнений.



придает каплям воды сферическую форму, и они сохраняют ее на гидрофобной поверхности масла. Но даже небольшие добавки мыла уменьшают поверхностное натяжение в каплях и позволяют им смочить поверхность (рис. 18.2.3 в, г). Силы Ван-дер-Ваальса притягивают к поверхности мыльные капли, и этого достаточно для того, чтобы капли превратились в плоские лужицы и растеклись.

В итоге мыльная вода оказывается “мокрее” чистой. Вода с мылом не собирается каплями на поверхности материала, а впитывается в него. Если вам нужно, чтобы во время стирки вода смочила каждую ниточку, вы добавляете мыло. Поскольку мыло способствует смачиванию поверхности, оно является смачивающим агентом. Кроме того, мыло — это поверхностно-активное вещество, потому что оно меняет свойства поверхности контакта двух сред. Бывают и другие поверхностно-активные вещества, но мыло и подобные ему средства составляют наиболее значимую группу таких веществ.

Впрочем, не все молекулы мыла оказывают такое действие на воду. Если мыла слишком много или поверхность достаточно удалена, ионы мыла собираются в сферические частицы, мицеллы, и в таком виде плавают в воде (рис. 18.2.4). В мицеллах заряженные полярные концы ионов ориентированы наружу, а незаряженные неполярные вытянуты к ее центру. Мицеллу окружают молекулы воды, которые переносят ее в объеме. А поблизости, как обычно, свободно перемещаются положительные ионы мыла — они нейтрализуют заряд.

Образование мицелл — второй результат добавления мыла в воду при стирке. Мицеллы стремятся выловить и собрать жирные молекулы загрязнений. Внутри мицеллы формируется неполярная среда, идеальная для жирных молекул. Когда молекулы масел сталкиваются с мицеллой, вода продавлиывает их внутрь, где они и остаются.

Мицеллы хаотично перемещаются в воде, по пути подбирая все молекулы жирных загрязнений. При небольшом тепловом и механическом воздействии мицеллы могут даже оторвать жирные молекулы от поверхности ткани. Безусловно, это весьма облегчает стирку. Мало-помалу жирная грязь захватывается плавающими в воде мицеллами.

Кроме того, мыло помогает удалить с одежды нерастворимую грязь. Мицеллы окружают частички загрязнений и способствуют тому, чтобы их унесло водой. Пыль, как правило, в воде не растворяется, и мыльные мицеллы играют большую роль, когда вам надо от нее избавиться.

Поскольку мицеллы мыла состоят из отрицательно заряженных ионов, они и сами несут отрицательный заряд и отталкиваются друг от друга в воде. Мицеллы подвижны, не слипаются и легко смываются вместе со своим содержимым.

На самом деле, большинство тканей также приобретает в воде отрицательный заряд. В волокнах есть слабо связанные атомы водорода, которые уносятся водой в виде протонов. Оставшиеся с отрицательным зарядом волокна отталкиваются от мыльных мицелл, также заряженных отрицательно. Отталкивание не дает частицам загрязнений вновь оседать на ткани.

Мицеллы мыла образуют в воде стабильную эмульсию. В отличие от простой смеси масла с водой, эмульсия не расслаивается, если дать ей постоять. Поверхностно-активные вещества, которые способствуют ее образованию и стабилизации, называются эмульгаторами. Эмульгаторы широко используются в кулинарии — в рецептуру майонезов, шоколада и прочих однородных, кремообразных продуктов входят яичные желтки, лецитин и разные виды камеди.

Теперь нам ясно, что стирать мылом хорошо, но откуда оно берется и какова его структура? Мыло делают из натуральных масел и жиров. Жиры и масла состоят из трех молекул жирных кислот, связанных с молекулой глицерина. Молекулы жирных кислот напоминают молекулы парафинов и олефинов с длинными углеводородными цепями, окруженными атомами водорода. Но на одном конце жирной кислоты имеется особый фрагмент, составленный из атомов углерода, кислорода и водорода, — карбоксильная группа, которая и делает эту молекулу органической кислотой (рис. 18.2.5).

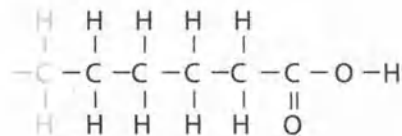
Кислота — это молекула, которая в водном растворе способна отдавать положительный заряженный ион водорода (протон  $H^+$ ). Один из атомов водорода карбоксильной группы легко отщепляется, так как соединенный с ним атом кислорода значительно оттягивает на себя его электрон. Кислород и водород соединяются ковалентной связью и делают общую пару электронов, но атом кислорода сильнее притягивает ее, чем атом водорода. Из-за этого атом водорода становится относительно беззащитным, и оказавшиеся рядом молекулы воды легко забирают его. Потеряв протон, остаток кислоты превращается в отрицательно заряженный ион.

В природных маслах и жирах три жирные кислоты не являются ионами. Они выстраиваются у молекулы глицерина, словно три длинные баржи в узком доке. Молекула глицерина имеет три атома углерода, у каждого из которых “пришвартовано” по одной жирной кислоте (рис. 18.2.6, а). Получается так называемый триглицерид. Триглицериды такой структуры неполярны и в воде практически не растворимы. По внешним и тактильным свойствам они похожи на минеральные (нефтяные) масла — и те и другие состоят из одинаковых длинных углеводородных цепей. Но триглицериды, в отличие от минеральных масел, съедобны.

Триглицериды, в состав которых входят парафиноподобные жирные кислоты, называются насыщенными жирами, так как их молекулы имеют только простые ковалентные связи и максимально возможное количество атомов водорода. Между молекулами развиваются сильные ван-дер-ваальсовы силы, и при относительно высоких температурах эти жиры твердые. Насыщенные жиры обнаруживаются в животных жирах и таких тропических растениях, как пальма и кокос.

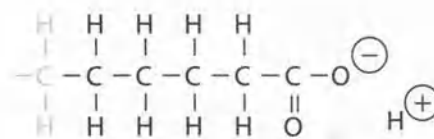
Триглицериды, образованные олефиноподобными жирными кислотами, называются ненасыщенными жирами — они имеют двойные связи, поэтому в них меньше атомов водорода. Двойные связи придают углеводородному скелету

а)



Жирная кислота

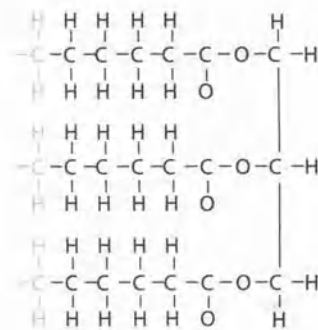
б)



Жирная кислота в воде

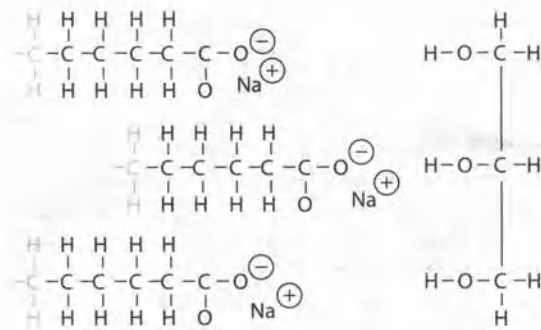
Рис. 18.2.5. (а) Жирная кислота представляет собой длинную углеводородную молекулу с карбоксильной группой на конце. (б) В водном растворе молекулы воды забирают у карбоксильной группы атом водорода в виде положительно заряженного иона ( $H^+$ ), а остаток кислоты приобретает отрицательный заряд.

а)



Жир (триглицерид)

б)



Мыло

Глицерин

Рис. 18.2.6. (а) Молекула жира, или триглицерид, состоит из трех жирных кислот, связанных с молекулой глицерина. В результате реакции триглицерида с гидроксидом натрия (щелочью) жирные кислоты отщепляются, и образуется смесь мыла и глицерина (б).

жесткость и ослабляют межмолекулярные взаимодействия. Масла, в состав которых входят такие кислоты, плавятся при относительно низких температурах; они содержатся в рыбьем жире и растениях умеренных широт, например в сое и кукурузе. Как ни грустно, людям больше нравится вкус менее полезных насыщенных жиров, чем ненасыщенных. В пищевой промышленности, в частности для производства маргаринов и сладостей, используются твердые жиры, которые получают путем гидрогенизации — превращения ненасыщенных жиров в насыщенные.

Когда триглицериды вступают в реакцию с гидроксидом натрия (щелочью), появляется новый продукт — мыло. Гидроксид натрия образован положительно заряженным ионом натрия ( $\text{Na}^+$ ) и отрицательно заряженным гидроксильным ионом ( $\text{OH}^-$ ); это соединение мгновенно растворяется в воде, и независимые ионы переходят в раствор. Если смешать жир, воду и щелочь, молекулы жира подвергнутся атаке со стороны гидроксильных ионов щелочи и от триглицерида отделятся жирные кислоты в виде отрицательно заряженных ионов (рис. 18.2.6, б). Вскоре в водном растворе окажутся молекулы глицерина, отрицательно заряженные кислотные остатки и положительно заряженные ионы натрия. По завершении реакции основная масса воды удаляется и остается мыло. Глицерин можно убрать, а можно оставить.

От того, из каких кислот сделано мыло, зависит его твердость. Из насыщенных жиров получается твердое кусковое мыло, из ненасыщенных — жидкое. В состав мягкого мыла для рук часто входит глицерин. В наше время для производства мыла используется натриевая щелочь, следовательно, оно является солью натрия, а раньше применяли гидроксид калия, полученный из древесного пепла и извести, — и тогда мыло представляло собой калиевую соль.

## Умягчение воды

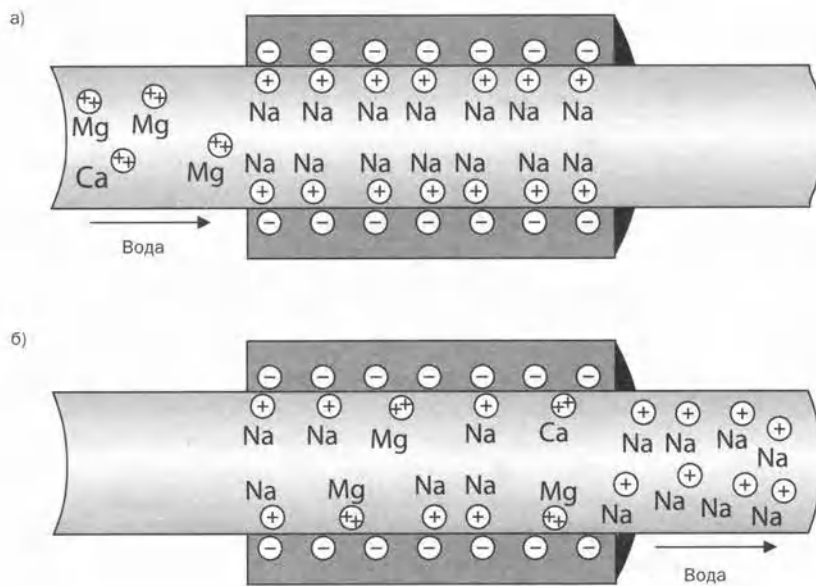
К сожалению, стирка — не такое уж простое дело. Мыло отлично удаляет с одежды жиры и масла, однако в жесткой воде не все идет гладко. Жесткой считается вода, в которой содержание положительно заряженных ионов кальция и магния превышает 120 мг на литр. Ионы этих и некоторых других металлов связывают отрицательные ионы мыла и создают нерастворимую пену, оседающую грязным налетом на раковине, лейке душа, ванне, в стиральной машине и на одежде. Затевая стирку мылом в жесткой воде, будьте готовы к неприятным сюрпризам.

Причина этого явления кроется в принципиальном отличии ионов кальция и магния от ионов натрия и калия, которые обычно входят в состав мыла. Атомы натрия и калия имеют на один электрон больше, чем необходимо для заполнения электронной оболочки — такое квантовое состояние было бы наиболее устойчивым. Лишний электрон легко отрывается, а оставшийся положительно заряженный ион так же легко переходит в водный раствор. Вода так хорошо взаимодействует с ионами натрия, что практически все известные науке натриевые соли отлично в ней растворяются. Именно высокой растворимостью натрия объясняется высокое содержание этого элемента в морской воде. Ионы калия взаимодействуют с водой почти так же легко, как ионы натрия. Соли, составленные из положительных ионов калия или натрия и отрицательных ионов мыла, прекрасно растворяются в воде.

А вот кальций и магний имеют по два лишних электрона по сравнению с тем, сколько требуется для завершения электронной оболочки. Они менее охотно отдают свои два электрона для образования положительных ионов и хуже растворяются в воде. Если некоторые соли кальция и магния в той или иной степени растворяются в воде, то мыльные соли этих металлов нерастворимы.

Если добавить мыло в жесткую воду, имеющиеся в ней положительные ионы кальция и магния свяжутся с отрицательными ионами мыла и моментально образуют нерастворимые соли. Эти соли дадут пастообразный осадок, который налипнет везде, где можно. Мыльные соли оседают на раковине, часто в виде некрасивых полосок. Чтобы выстирать белье в воде, содержащей много растворенных минералов, надо либо удалить из нее ионы кальция и магния, либо воспользоваться не мылом, а другим средством. Обычно идут в ход оба приема.

Для начала избавимся от кальция с магнием. Такой процесс называется умягчением воды, и в большинстве прачечных это делают всегда задолго до пуска воды



**Рис. 18.2.7.** (а) Свежий ионообменник для умягчения воды содержит ионы натрия ( $\text{Na}^+$ ), расположенные рядом с отрицательными ионами в полимере или цеолитной керамике. (б) По мере прохождения воды, содержащей ионы магния ( $\text{Mg}^{2+}$ ) и кальция ( $\text{Ca}^{2+}$ ), сквозь этот материал ионы натрия высвобождаются, а на их место встают ионы магния и кальция.

в стиральные машины. Существуют разные способы умягчения воды, но самый интересный для нас и один из наиболее популярных в домашнем хозяйстве — это ионный обмен. Воду пропускают через ионообменник (ионообменный материал), где ионы кальция и магния заменяются ионами натрия (рис. 18.2.7).

Ионообменник — это особого вида керамический материал (цеолит) или полимер, в пористой структуре которых имеется множество отрицательно заряженных точек. Рядом с отрицательными зарядами выстраиваются положительные ионы, поэтому в целом вещество нейтрально. Области с отрицательным зарядом входят в состав материала и мигрировать не могут, а положительные ионы подвижны.

В свежем ионообменнике почти все положительные ионы — это ионы натрия. Когда сквозь него проходит жесткая вода, ионы натрия постепенно вытесняются ионами кальция и магния. Поскольку ионы натрия лучше растворяются в воде, чем ионы магния и кальция, то они с большей вероятностью оказываются в ней, а ионы кальция и магния стремятся уйти из воды. Каждый прилипший к ионообменному веществу ион кальция или магния вытесняет по два иона натрия, которые уходят из ионообменника в воду.

Вода на выходе из ионообменника по-прежнему содержит ионы, но уже не магния и не кальция, а ионы натрия. Натриевые ионы не мешают нам мыться и стирать, но те, кто придерживается бессолевой диеты, предпочитают не использовать умягченную воду. Не стоит наливать умягченную воду и в утюг с отпаривателем.

Если все ионы натрия замещены на ионы кальция и магния, ионообменный материал уже не годится для умягчения воды. Чтобы его регенерировать, необходимо промыть его концентрированным раствором соли. Взятые в избытке ионы натрия вытеснят большую часть ионов кальция и магния, и ионообменник вернется в прежнее состояние — он снова насыщен ионами натрия и готов к использованию.

Далеко не все держат дома систему для умягчения воды, поэтому средства для стирки сами делают ее мягче. В их состав входят специальные компоненты, которые связывают ионы кальция и магния и не дают им взаимодействовать с ионами мыла. Самая эффективная добавка такого рода — триполифосфат натрия, и было время, когда стиральные порошки содержали весьма значительное его количество. Однако фосфаты способствуют росту ряски в водоемах, что наносит большой вред экологии рек, озер и морских заливов, поэтому многие страны отказались от его использования. Сейчас вместо него в средства для стирки чаще добавляют кальцинированную соду (карбонат натрия), лимонную кислоту и цитрат натрия.

Другой вариант — добавить в средство для стирки маленькие частички цеолита. Они обеспечивают обмен ионов кальция и магния на ионы натрия и смягчают воду прямо в стиральной машине. Частицы цеолита оседают на дно машины, откуда и вымываются.

## Моющие средства

Но умягчение воды — это еще полдела. Поскольку удалить из воды весь кальций и магний не удастся, производители убирают из состава моющих средств и само мыло. Это чистая правда — большинство моющих средств (детергентов) вовсе не являются мылом. Синтетические средства для стирки схожи с мылом по строению, но больше ничего общего с ним не имеют.

Мыло, конечно, тоже моющее средство. Моющие средства — это широкий класс веществ, которые стабилизируют смесь воды и масла. Существует огромное разнообразие веществ, способных решать эту задачу и, таким образом, служить моющими средствами.

Самые распространенные детергенты — алкилбензолсульфонаты линейной структуры (рис. 18.2.8, а). Это продукты переработки нефти, натриевые соли, как и большинство видов мыла, но с отрицательными ионами другого строения. Напомню, что отрицательный ион мыла — это длинная углеводородная цепь с отрицательно заряженной карбоксильной группой. Ион детергента — тоже углеводородная цепь, но соединенная с ароматическим (бензольным) кольцом, к которому крепится отрицательно заряженная сульфоновая группа, или сульфогруппа. В сульфогруппу входят один атом серы и три атома кислорода.

Молекула моющего вещества имеет две рабочие части — заряженную головку и длинный неполярный хвост. Заряженная головка — это сульфоновая группа, в которой атом серы соединен с одним атомом углерода и тремя атомами кислорода. Такая комбинация предполагает примерно тетраэдрическую структуру. Но возможно ли это — ведь обычно атом серы связывается только с двумя другими атомами?

Во-первых, атом серы образует нормальные ковалентные связи с атомом углерода и одним из атомов кислорода. Этот атом имеет лишний электрон и как отрицательный ион может образовать только простую ковалентную связь.

Во-вторых, атом серы предоставляет двум другим атомам кислорода свою электронную пару в общее пользование. Поскольку обобществленные электроны делокализованы между атомами, их длины волн и кинетическая энергия уменьшаются. Таким образом, атомы кислорода соединяются с атомом серы. Получается группа с отрицательным зарядом, которая легко взаимодействует с молекулами воды.

Длинная неполярная часть молекулы моющего вещества — это, в сущности, неразветвленная парафиновая цепь, иначе называемая линейным алкильным радикалом. Эта цепь служит жирным хвостом молекулы детергента. Первые алкилбензолсульфонатные детергенты содержали разветвленные углеводородные цепи, но выяснилось, что они хуже разлагаются в природе, чем линейные ради-

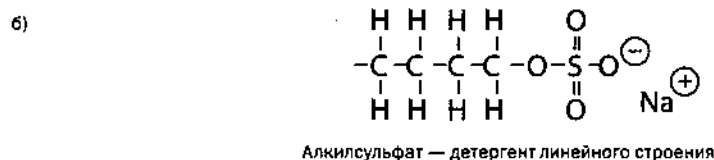
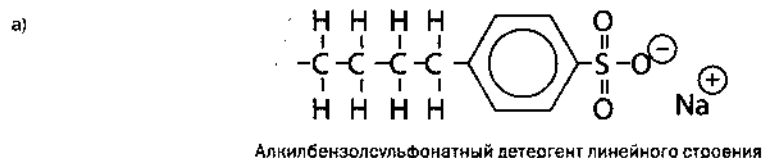
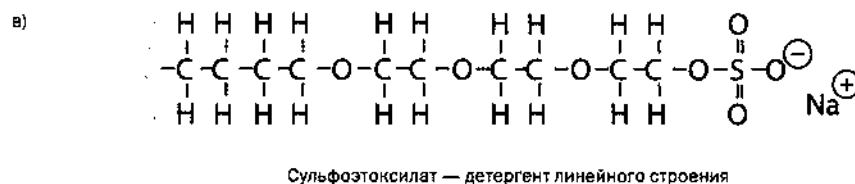


Рис. 18.2.8. (а) В молекуле самого распространенного моющего средства ароматическое (бензольное) кольцо соединяет длинную углеводородную цепь с гидрофильной сульфогруппой. В наиболее часто используемом моющем компоненте шампуня углеводородный хвост соединяется с сульфогруппой либо через атом кислорода (б), либо через цепочку атомов кислорода и углерода (в).





калы. Длинные углеводороды прямого строения родственны животным и растениям, поэтому могут перерабатываться бактериями, а разветвленные цепи редко встречаются в природе, и бактерии их не воспринимают. Чтобы реки и озера не покрывались пеной, производители стали выпускать только моющие средства с линейной структурой.

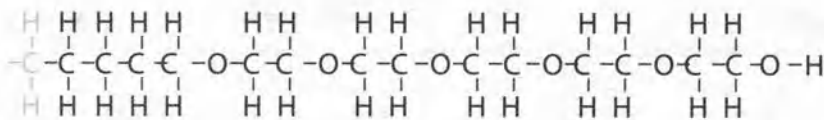
Последний фрагмент молекулы детергента — ароматическое (бензольное) кольцо. Это побочный эффект технологического процесса. Присоединить алкильный радикал и сульфогруппу по отдельности к бензольному кольцу намного проще, чем напрямую друг к другу. Жаль только, что наличие кольца затрудняет биологическое разложение моющего вещества в окружающей среде. Существуют другие детергенты линейного строения, например алкилсульфаты (сульфаты спиртов) и сульфозтоксилаты, в которых бензольное кольцо заменено на атом кислорода (рис. 18.2.8, б) или цепочку из атомов углерода и кислорода (рис. 18.2.8, в). Среди алкилсульфатов наиболее распространен лаурилсульфат натрия, в гидрофобной цепи которого 14 атомов углерода. Типичный представитель сульфозтоксилатов — лауретсульфат натрия, также с 14 атомами углерода в цепи. Эти моющие вещества, входящие в состав многих шампуней и средств для мытья посуды, производятся из масел тропических растений.

С серосодержащими моющими веществами кальций и магний не образуют нерастворимого осадка, так почему же остается проблема умягчения воды при стирке? Дело в том, что кальций с магнием мешают работе мицелл и не дают им захватывать с ткани загрязнения, так чтобы те оставались в воде во взвешенном состоянии. Заряд ионов кальция и магния вдвое больше, чем заряд натрия и калия, и, обладая столь сильным зарядом, кальций и магний при сближении с мицеллами частично нейтрализуют их поверхность. Нейтрализованные мицеллы слабее отталкиваются друг от друга и от ткани, поэтому плохо отстирывают одежду. Вот почему и прачечные, и производители стиральных порошков стараются избавиться от ионов кальция и магния.

В завершение темы стоит отметить, что не все детергенты являются отрицательно заряженными ионами (анионами). Можно синтезировать детергенты с положительно заряженными ионами (катионами) и даже вовсе без ионов. Но катионные детергенты и поверхностно-активные вещества не используют при стирке из-за их способности приставать к ткани — это скорее кондиционеры для тканей, о чем мы поговорим чуть позже. А вот неионные моющие средства широко применяются для стирки одежды.

Единственное требование к мощному веществу — способность стабилизировать эмульсию масла в воде. Молекулы неионных (неионогенных) поверхностно-активных веществ не имеют заряда, но имеют гидрофильные и гидрофобные концы (рис. 18.2.9). Гидрофобный конец, как и у большинства детергентов, представляет собой длинную углеводородную цепь. Гидрофильный конец — тоже углеводородная цепь, но в ней атомы углерода перемежаются с атомами кислорода и соединяются с атомами водорода. Атомы кислорода этой нетипичной цепи образуют водородные связи с молекулами воды, благодаря чему соответствующий конец молекулы проявляет гидрофильные свойства. Такие неионные молекулы образуют мицеллы и весьма эффективно удаляют грязь с одежды.

Неионные поверхностно-активные вещества не меняют своего поведения в жесткой воде и с некоторыми видами загрязнений справляются успешнее, чем анионные детергенты, — они особенно хороши, когда надо отстирать синтетические вещи от косметических масел. Они не являются солями и существуют в виде жидкости или восковидного твердого вещества. Поэтому неионные поверхностно-активные вещества не входят в рецептуру стиральных порошков, зато часто используются в производстве жидких моющих средств.



Неионное (неионогенное) поверхностно-активное вещество

Рис. 18.2.9. Молекула неионного поверхностно-активного вещества состоит из гидрофобной углеводородной цепи (слева), соединенной с гидрофильной цепью, в которую входят атомы кислорода (справа).

Не всякую грязь удастся отстирать в воде обычным моющим средством. Если вещество образует ковалентные связи с волокнами ткани, получаются пятна, которые можно удалить только с помощью отбеливателя или ферментов. Отбеливатель лишает молекулы загрязнения окраски или разрушает их связи с тканью. Ферменты расщепляют большие молекулы загрязнения на мелкие фрагменты, которые можно смыть. Если повезет, ткань и ее расцветка при этом не пострадают.

В отличие от мыла и детергентов, отбеливатели вступают в химическую реакцию с молекулами пятна. Они особенно активны в реакциях превращения двойных связей в простые за счет присоединения молекул кислорода и хлора к обоим атомам, между которыми была образована двойная связь. Цвет органическим молекулам зачастую придают именно двойные связи, поэтому перестройка приводит к обесцвечиванию.

Подобно тому как атомы поглощают и испускают кванты света, характерные для их электронного состояния, так и молекулы поглощают и испускают фотоны, характерные для их электронного состояния. Электроны в молекуле чувствительны к электромагнитному излучению и реагируют на прохождение фотонов, что может привести к их переходу на незанятые уровни с более высокой энергией. Столкнувшись с таким фотоном, электрон может совершить излучательный переход в возбужденное состояние и поглотить фотон. Рано или поздно электрон вернется в первоначальное состояние, а избыточная энергия перейдет в тепловую, но фотон будет потрачен. Если в молекуле есть электроны, способные поглощать кванты видимого света по такой схеме, вещество будет окрашено.

В простой ковалентной связи оба электрона, как правило, так надежно зафиксированы между двумя атомами, что переход в новое электронное состояние требует больше энергии, чем может предоставить фотон видимого света. Излучательный переход таким электронам могут обеспечить только ультрафиолетовые лучи. На молекулы с простыми ковалентными связями видимый свет никак не воздействует, поэтому они бесцветны.

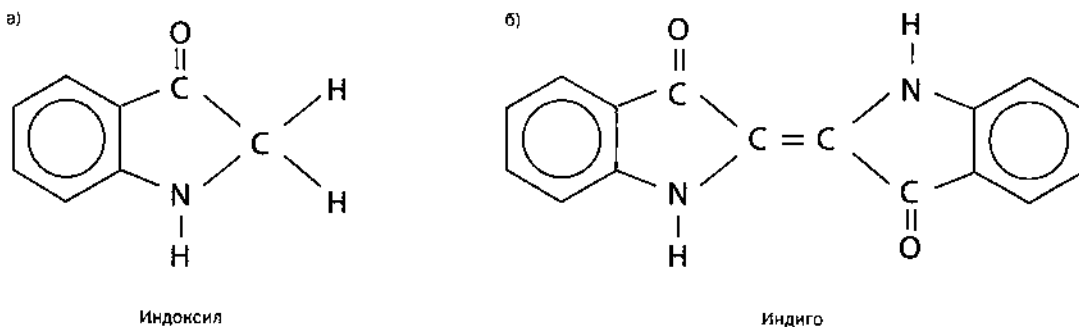
Но внешние электроны двойной ковалентной связи более подвижны и могут относительно легко попасть на другой электронный уровень — квант видимого света вполне способен спровоцировать такой переход. Если двойная связь поглощает кванты синего света, вещество кажется желтым. Поглощение красных фотонов вызывает окрашивание в синий цвет. Работают обычные правила субтрактивного синтеза цветов.

Затраты энергии на подобный переход определяются химической природой вещества и окружением двойной связи. Ключевую роль при этом играют атомы, соединенные двойной связью. Помимо углерод-углеродной двойной связи важны двойные связи между углеродом и кислородом, углеродом и азотом, азотом и кислородом, а также двумя атомами азота. Эти связи, особенно две последние, часто отвечают за окраску. Группы атомов, придающие цвет веществу, называются хромофорами.

Однако тот или иной цвет вещество приобретает в зависимости от строения заместителя, прилегающего к двойной связи. Поскольку все электроны молекулы воздействуют друг на друга электростатически и подчиняются принципу Паули, на окрашивание, обусловленное электронами двойной связи, влияет строение молекулы в целом. Малейшее изменение структурной формулы может привести к тому, что красное вещество станет оранжевым. Именно этот принцип используют при производстве органических красителей, чтобы добиться разнообразия цветов с ограниченным набором хромофоров (рис. 18.2.10).

Художник порадовался бы разноцветным молекулам, но на одежде лишние краски совсем не нужны. Вот тут-то и понадобится отбеливатель. Отбеливатель атакует двойные связи и разрушает хромофоры в молекулах загрязнений. Молекулы останутся на ткани, но уже не будут поглощать видимый свет.

Все отбеливатели делятся на два основных класса — хлорсодержащие и кислородные. Хлорсодержащие отбеливатели предоставляют свои атомы хлора и кислорода для присоединения по двойной связи. Один из атомов углерода, об-



разующих двойную связь, соединяется с атомом хлора, а другой — с атомом кислорода из гидроксильной группы (ОН), и двойная связь ликвидируется.

К сожалению, хлорсодержащие отбеливатели так легко вступают в реакции с различными химическими соединениями, что заодно портят ткань. Они могут разрушить хромофоры красителей, и цветная материя превратится в белую. Могут модифицировать молекулы красителя, и ткань поменяет цвет. А кроме того, хлорсодержащие отбеливатели портят сами натуральные волокна, разрушая их молекулы и делая ткань более рыхлой. Они успешно удалят с вашей одежды цветные пятна, но не могут оставить на ней дырки.

Кислородные отбеливатели атакуют двойные связи с помощью перекиси водорода. Молекула перекиси водорода напоминает молекулу воды, в которой между кислородом и одним из атомов водорода вставлен еще один кислородный атом. В воде перекись водорода разлагается, и ее фрагменты — ионы или свободные радикалы — присоединяются к другим молекулам по двойной связи. И вновь хромофор разрушается, а пятно бледнеет.

Перекись водорода менее активна, чем хлорсодержащие отбеливатели, и наносит меньше вреда полимерным молекулам волокон, поэтому ткани лучше сохраняются. Красители ткани также меньше страдают от перекиси водорода, чем от хлорсодержащих отбеливателей. Но если при помощи перекиси водорода часто обесцвечивают волосы, значит, она способна разрушать пигменты некоторых натуральных волокон.

Сама по себе перекись водорода очень неустойчива и нередко генерируется непосредственно в стиральной машине при разложении другого вещества — пербората натрия. Такое разложение возможно лишь при температуре выше 50 °С, поэтому отбеливание надо проводить в горячей воде. Некоторые стиральные порошки содержат активаторы, способствующие разложению пербората натрия в более прохладной воде, но в горячей эффект будет сильнее.

Ферменты — это биологические катализаторы. Огромное количество ферментов в вашем организме катализирует разнообразные химические реакции, которые без ферментов при температуре тела или не пошли бы, или пошли бы по неблагоприятному пути. Ферменты облегчают синтез и разложение веществ, а также перегруппировку молекул.

В состав моющих средств чаще всего входят ферменты, способные расщеплять белки. Белки прочно связываются с волокнами ткани, не растворяются в воде и не дают детергентам проникать в ткань. Молекулы белков служат связующим компонентом для других молекул, образуя трудновыводимые пятна. Кровь, молоко, яйца, мясная подлива — все это оставляет пятна белкового происхождения.

Проще всего удалить такие пятна, если расщепить молекулы белка. Разложение происходит под действием протеолитических ферментов (протеаз), катализаторов взаимодействия воды с белками. В этом процессе молекула белка рвется, а фрагменты молекулы воды прикрывают оборванные концы. Дайте им время, и протеазы нарежут длинные белковые молекулы на составляющие — аминокислоты и пептиды, короткие цепочки из аминокислот. Пятно распадется и смывается водой с моющим средством. Похожим образом действует специальный состав для размягчения мяса — содержащийся в нем папаин (протеолитический фермент, который извлекают из незрелых плодов папайи) расщепляет белки мяса.

**Рис. 18.2.10.** (а) Индоксил — бесцветное водорастворимое вещество, которое получают из ферментированного растительного экстракта. Под воздействием кислорода воздуха две молекулы индоксила "спариваются" и образуют нерастворимый в воде краситель индиго (б), которым красят джинсовую ткань в синий цвет. Двойная связь в середине молекулы индиго является хромофором, а остальные фрагменты определяют оттенок вещества. Отбеливатели и ультрафиолетовое излучение разрушают двойную связь, поэтому синие джинсы линяют.

Однако протеазы могут оказывать влияние и на здоровье людей, которые их применяют. Вы ведь не хотите, чтобы белки в вашем организме распадались, пока вы стираете или носите выстиранную одежду. Несмотря на то что результаты исследований вроде бы говорят о безвредности ферментов в составе бытовых моющих средства, ферменты добавляют в стиральные порошки в очень ограниченных количествах, дабы избежать возможных нежелательных последствий.

## Оптические отбеливатели и кондиционеры

Не все химические средства для стирки смываются бесследно при полоскании. Оптические отбеливатели и кондиционеры для белья сохраняются на ткани и продолжают делать свое дело еще долго после сушки. Оптические отбеливатели влияют на вид вещей, а кондиционеры — на их тактильные качества (туше ткани).

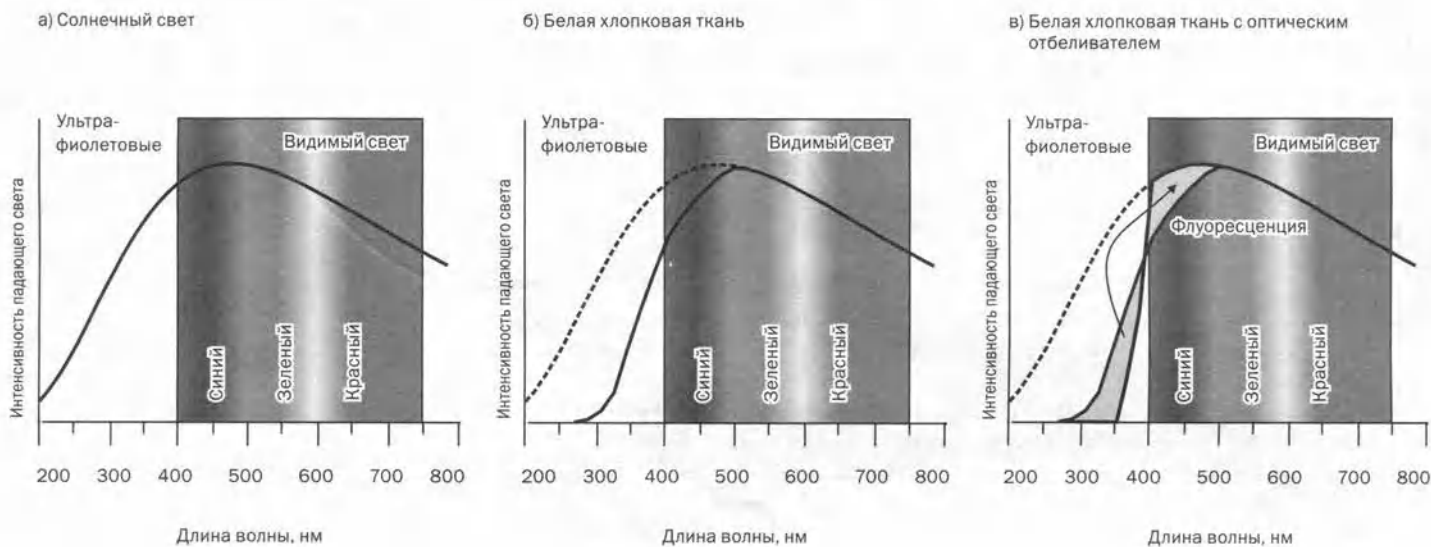
Белые ткани, например хлопковые, со временем начинают интенсивнее поглощать синий свет, отчего желтеют (рис. 18.2.11, б). Стирка и химическое отбеливание не способствуют сглаживанию этого эффекта. На самом деле молекулы отбеленных волокон и сами имеют свойство слегка желтеть. В былые годы с желтизной боролись, добавляя в воду для полоскания синьку. Подсинивающий агент поглощал красные и зеленые лучи, тем самым уравнивая поглощение волокнами синего света, так что ткань казалась бесцветной. Синька затемняла ткань до светло-серых тонов — ткань отражала значительно меньше света, чем на нее попадало, и таким образом вызванная старением материала желтизна компенсировалась.

Современные технологии стирки вместо подсинивающих средств используют вещества, которые делают ткань более яркой за счет оптических явлений. Оптические отбеливатели — это просто флуоресцентные красители, способные поглощать ультрафиолетовое излучение и испускать голубовато-белый видимый свет. Чтобы придать ткани белизну, они не поглощают красные и синие лучи, а возвращают недостающую синюю составляющую света (рис. 18.2.11, в). Та энергия, которая не уходит из молекулы с выпущенным фотоном, превращается за счет колебаний во внутреннюю энергию ткани.

Если прополоскать вещи с флуоресцентным красителем такого типа, его молекулы осядут на ткани и сделают ее ярче. Мы не видим ультрафиолетовые лучи, которые поглощает обработанная оптическим отбеливателем ткань, а испускаемые ею синие лучи видим. При этом восстанавливается недостающий синий компонент света, отчего ткань кажется белоснежной. На самом деле она может испустить даже больше синего света, чем на нее попало раньше, и станет «белее белой». В комнате, освещенной только ультрафиолетовым светом, оптические отбеливатели придают материи неестественное фиолетовое сияние.

Кондиционеры для белья — это химические вещества, которые также остаются на ткани после стирки. В основном это катионные поверхностно-активные

**Рис. 18.2.11.** При дневном свете (а) белая хлопковая ткань отражает меньше синих лучей, чем должна была бы, и из-за этого кажется желтоватой (б). Со временем желтизна усиливается. Но если добавить к хлопку флуоресцентный оптический отбеливатель (в), он превратит ультрафиолетовое излучение в синий свет, и ткань вновь засияет белизной.





**Рис. 18.2.12** (а) В молекуле аммиака три атома водорода связаны с атомом азота. (б) В ионе аммония четыре атома водорода связаны с положительно заряженным ионом азота. (в) В кондиционерах для белья ион четвертичного аммония образуется в результате замещения четырех атомов водорода углеводородными цепями.

вещества, соединения четвертичного аммония. Они являются производными положительного иона аммония, а он, в свою очередь, строится на положительном ионе азота. В нормальном состоянии атом азота имеет пять валентных электронов, и для завершения электронной оболочки он должен поделить три электрона с другими атомами, так чтобы сформировались четыре электронные пары. Если атом азота делит эти электроны с тремя атомами водорода, получается молекула аммиака (**рис. 18.2.12, а**). Но если атом азота отдаст один электрон, он должен будет задействовать для завершения своей оболочки четыре электрона, то есть сможет присоединить уже четыре атома водорода. В этом случае получается положительный ион аммония (**рис. 18.2.12, б**).

В четвертичных соединениях аммония ион азота, несущий положительный заряд, образует ковалентные связи с четырьмя атомами. Однако это уже не атомы водорода. В молекулах кондиционеров для тканей центральный ион азота связан с четырьмя углеводородными цепями (**рис. 18.2.12, в**). Два заместителя короткие, по одному атому углерода, а в цепочках двух других может насчитываться до 18 углеродных атомов. Эти длинные гидрофобные цепи проявляют свойства масел, как многие смазочные средства. Их способность смягчать ткань обусловлена именно схожестью с маслами.

Когда вы наносите на мокрую ткань кондиционер, его положительные поверхностно-активные ионы притягиваются к отрицательно заряженным волокнам и прочно соединяются с ними. Анионные поверхностно-активные вещества отталкиваются мокрой тканью, а катионные притягиваются к ней и делают ее мягче.

Молекулы поверхностно-активного вещества цепляются к ткани своими длинными гидрофобными хвостами, направленными наружу. Эти молекулы облепляют каждое волокно каждой ниточки ткани, создавая маслянистое покрытие. Углеводородные цепи смазывают ткань, так что волокна легко скользят в нитях и нити легко скользят в ткани. Смазка делает ткань более пластичной и мягкой на ощупь. Впрочем, это не всегда считалось достоинством. (см. **❶**).

Кондиционеры также немного усиливают гидрофобные свойства ткани, благодаря чему вещи быстрее сохнут при центробежной сушке в стиральной машине. В процессе сушки вещи очень быстро вертятся по кругу с направленным к центру ускорением, а со стороны стенок барабана на них действуют очень большие, направленные к центру силы. Инерция воды отделяет воду от движущихся с ускорением вещей, и она вытекает из барабана сквозь дырочки. Слегка усиливая гидрофобность ткани, кондиционеры способствуют стряхиванию воды во время вращения, поэтому долго держать одежду в режиме горячей сушки не потребуется.

Кондиционеры приподнимают ворс хлопковых махровых полотенец. Волокно хлопка от природы гидрофильно и хорошо связывается с каплями воды. Высыхая, капли воды уменьшаются и притягивают волокна хлопка ближе друг к другу. Когда не обработанное кондиционером полотенце высохнет, его волокна окажутся стиснуты этими силами и ворс опустится. А полотенце, обработанное кондиционером, достаточно гидрофобно, чтобы капли воды не могли в процессе сушки притянуть волокна хлопка друг к другу. Ворс остается густым и рыхлым, а полотенце — пушистым. К сожалению, то же самое гидрофобное покрытие в какой-то степени снижа-

**❶** Мягкость ткани не всегда приветствовалась. Когда-то хлопчатобумажные ткани, а также натуральный и искусственный шелк обрабатывали специальными средствами, чтобы они стали жестче и издавали при движении характерные шелест и шуршание. При такой обработке усиливалось трение между волокнами, и если детали одежды терлись друг о друга, слышно было, как они похрустывают.

ет абсорбционные свойства ткани — серьезный недостаток для хлопкового полотна. Хотите золотой середины — не злоупотребляйте кондиционерами для белья.

Несмотря на наличие гидрофобных хвостов, четвертичные соединения аммония все же слабо притягивают к поверхности ткани молекулы воды. Они гигроскопичны в том смысле, что притягивают молекулы воды прямо из воздуха. Поскольку вода очень слабо проводит электричество, обработанная кондиционером ткань тоже становится слабым проводником. Из-за проводимости статический заряд накапливается на ткани хуже, и она не линнет к телу.

Во время сушки в машине необработанные вещи трутся друг о друга, и между разнородными тканями происходит передача заряда. Возникает значительное смещение зарядов, и вы достаете из машины вещи, притянутые друг к другу электростатическими силами. А в обработанных вещах электростатический заряд равномерно распределяется в удержанной кондиционером влаге.

Четвертичные соединения аммония также включают в состав кондиционеров и шампуней для волос, чтобы волосы были мягче и не электризовались, — эти вещества способны обеспечить покрытие и смазку чему угодно. Они покрывают и буквально душат бактерии, то есть фактически обладают бактерицидным эффектом. Кроме того, эти соединения могут нарушать метаболизм белков бактерий и делать эти бактерии неактивными. Четвертичные соединения аммония входят в состав некоторых пастилок от боли в горле и ополаскивателей для рта в качестве антимикробных компонентов.

Однако положительный заряд четвертичных соединений аммония плохо совместим с отрицательным зарядом анионных моющих средств. Оказавшись в одном растворе, ионы разных типов притягиваются и могут слипаться. Чтобы этого не произошло, их надо изолировать друг от друга, поэтому принято добавлять кондиционеры на стадии полоскания или сушки, а при мытье волос пользоваться отдельным ополаскивателем. Впрочем, иногда удается успешно сочетать в формуле шампуня или стирального порошка катионные кондиционеры и анионные моющие вещества.

## Моющие добавки

В состав средств для стирки входят и немаловажные вспомогательные ингредиенты. Мы уже знаем, как работают анионные и неионные моющие средства (поверхностно-активные вещества), кондиционеры для смягчения ткани, химические и оптические отбеливатели. Но есть еще и стабилизаторы пенообразования, ингибиторы коррозии и повторного отложения загрязнений, эмульгаторы.

Стабилизаторы пенообразования контролируют рост пузырьков. Они могут как усиливать, так и подавлять образование пены. Хотите верьте, хотите нет, но пена не имеет никакого отношения к эффективности стирального порошка. То же самое можно сказать о шампунях и средствах для мытья посуды. Однако объем пены, которую создает моющее вещество, влияет на способ его применения. Если стиральный порошок обильно пенится, может показаться, что он более эффективен, чем на самом деле, и его надо сыпать экономнее. В таком случае вы рискуете взять меньше порошка, чем требуется для безупречной стирки. Если пены мало, вам кажется, что порошок плохой и стоит перейти на другую марку. Поэтому производители моющих средств и шампуней тщательно рассчитывают способность своей продукции к пенообразованию.

В чистой воде пузырьки долго не живут — лопаются под действием поверхностного натяжения. Пограничные слои молекул на внутренней и внешней поверхностях пузырька взаимодействуют так сильно, что малейший дефект немедленно приводит к разрыву, сквозь который выходит воздух. Мыло и моющее средство стабилизируют пузырьки, уменьшая поверхностное натяжение и снижая вероятность разрыва.

Время жизни отдельно взятого пузырька зависит от многих свойств смеси, но только не от ее моющей способности. Одни поверхностно-активные вещества очень хорошо стабилизируют пузырьки и увеличивают продолжительность их существования, другие, наоборот, создают дефекты, из-за чего пузырьки лопаются. Особенно эффективно ослабляют пену полиметилсилоксаны (метиконы), в присутствии которых пузырьки рвутся и пена оседает. Эти полимеры использу-

ются как противопенные агенты и иногда даже входят в рецептуру антацидных лекарств.

Пенообразователи обычно добавляют в порошки для ручной стирки и шампуни — в этих случаях пена считается признаком хорошего моющего средства. Противопенные агенты используют в средствах для стиральных и посудомоечных машин, когда пены все равно не видно, а нормальный режим работы техники нарушается.

Ингибиторы коррозии выполняют важную функцию в средствах для стирки, поскольку без них ионы моющего вещества быстро вызвали бы образование ржавчины в стиральной машине. Коррозия — это электрохимический процесс, подобный тому, что описан в разделе 18.3 для батареек. При обычном ржавлении железа, из которого сделана сталь, подвергается атаке отрицательных гидроксильных ионов. Но взаимодействовать с железом, вызывая образование ржавчины, могут и другие ионы с отрицательным зарядом, в том числе ионы детергентов. Поэтому в состав моющих средств включают ингибиторы коррозии. Как правило, это силикаты натрия — водорастворимое жидкое стекло, описанное в разделе 17.1, где шла речь об окнах и стекле. Они создают тонкую стеклообразную пленку на поверхности деталей машины и не дают им ржаветь.

Ингибиторы повторного отложения загрязнений усиливают отрицательный заряд волокон мокрой ткани. Некоторые ткани, особенно синтетические, недостаточно электризуются в воде. Статический заряд необходим для того, чтобы на ткань не налипали отрицательно заряженные мицеллы моющего вещества. Поэтому стиральные порошки содержат карбоксиметилцеллюлозу — она вступает во взаимодействие с тканью и сообщает ей отрицательный заряд.

И наконец, эмульгаторы придают средствам для стирки и мытья структуру, удобную для фасовки их в пакки и флаконы. Сульфат натрия разрыхляет стиральные порошки, благодаря чему их удобнее насыпать. Натрия ксилосульфонат сохраняет в растворе все компоненты сильно концентрированных жидких моющих средств.

## Химическая чистка

---

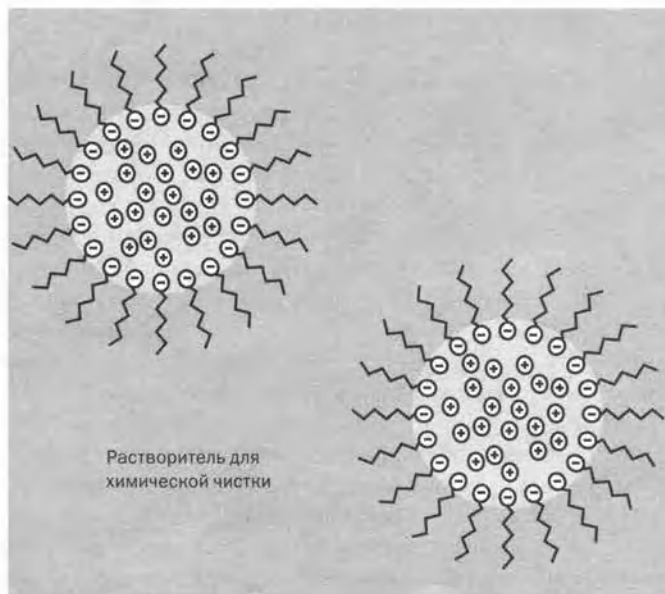
Некоторые вещи лучше не стирать в воде. Хлопок, шерсть, шелк и вискоза — все эти волокна очень гигроскопичны и впитывают воду, словно губка. Они образуют многочисленные водородные связи с молекулами воды и аккумулируют большую массу воды. Вода занимает объем, из-за чего волокно набухает. Хлопок, шерсть и натуральный шелк увеличиваются примерно на 1% по длине и на 15% по толщине. Вискоза расширяется еще заметнее — на 3% в длину и на 25% в сечении. Набухание портит ткань и меняет ее структуру. Когда ткань высохнет, может оказаться, что она села или сморщилась.

Чтобы процессы расширения и сжатия не испортили вашу одежду, сдайте ее в химчистку. Химическая чистка происходит в неполярном растворителе. Поскольку неполярный растворитель не образует водородных связей, между его молекулами и волокном действуют лишь слабые силы Ван-дер-Ваальса, и волокно не набухает. Одежда сохраняет форму.

За многие годы растворители для химической чистки не раз менялись, но первым средством для удаления пятен служил керосин. Химическую чистку поначалу проводили с помощью бензина, из-за чего нередко возникали пожары. В 1928 году появился менее горючий растворитель. Молекулы уайт-спирита, иначе называемого растворителем Стоддарда (в честь президента Национального института химической чистки У. Дж. Стоддарда), крупнее углеводородов бензина, поэтому он не такой летучий. Уайт-спирит получают прямой перегонкой нефти, а при температуре ниже 38 °С его пары в воздухе не вспыхнут.

Однако при сушке в горячем воздухе уайт-спирит тоже опасен, и вместо него стали использовать негорючие неполярные растворители. Самое распространенное современное средство химической чистки — это перхлорэтилен. Его молекула состоит из двух атомов углерода, соединенных двойной связью, при каждом из которых находится по два атома хлора. Атомы хлора так прочно связаны с атомами углерода, что молекулы не вступают в реакцию с кислородом и образуют негорючую жидкость.

**Рис. 18.2.13.** В растворителе для химической чистки детергенты образуют вывернутые наизнанку мицеллы. Полярные гидрофильные части молекул направлены внутрь, к крошечной капельке воды. Неполярные гидрофобные концы ориентированы наружу, в объем растворителя. Мицеллы собирают соли и прочие полярные молекулы загрязнений.



Если погрузить вещь в уайт-спирит или перхлорэтилен, жирные пятна растворятся. Неполярные растворители притягиваются к молекулам загрязнения силами Ван-дер-Ваальса и удаляют их. Хлорсодержащие растворители лучше чистят одежду, чем углеводородные, потому что сильнее притягиваются к молекулам жирных загрязнений. Атомы хлора активнее оттягивают на себя заряд, чем атомы водорода, благодаря чему возникают более значительные силы Ван-дер-Ваальса — по этой причине перхлорэтилен не закипит, пока вы не нагреете его до 121 °С.

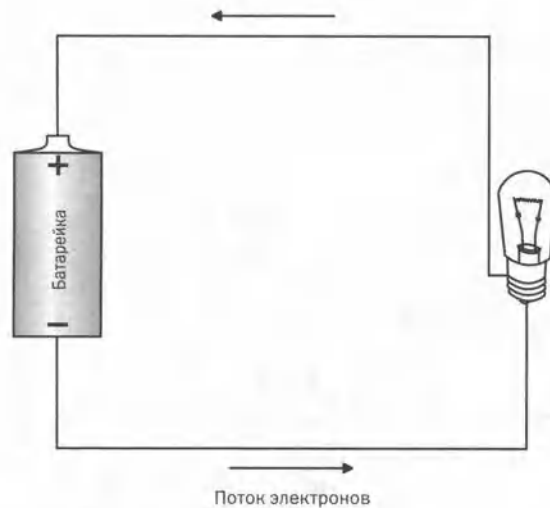
Но соли и другие полярные загрязнения в неполярных агентах не растворяются. Неполярные растворители плохо справляются и с нерастворимой грязью, в частности с пылью. Чтобы избавиться от загрязнения такого рода, в средства для химической чистки добавляют детергенты и немного воды. В неполярной среде детергенты образуют вывернутые наизнанку мицеллы, так что неполярные хвосты молекул обращены наружу, а полярные головки — внутрь (рис. 18.2.13). Каждая мицелла охватывает крошечную капельку воды. Как и при стирке в воде, детергенты помогают удалять те вещества, которые не растворяются в основной чистящей жидкости.

Количество воды в смеси для химической чистки строго регламентировано, чтобы в процессе чистки одежда не поглощала и не теряла влагу. Молекулы воды из воздуха попадают на ткань и улетают с нее в непрерывном режиме, при этом устанавливается равновесие. В таких условиях молекулы воды по-прежнему перемещаются в обе стороны, но в целом увлажненность одежды не меняется. Степень ее увлажненности зависит только от относительной влажности воздуха, которая в ателье химчистки обычно составляет около 70%.

Точно такой же процесс поглощения и отдачи влаги происходит и в среде растворителя. Молекулы воды курсируют между тканью и растворителем, так что устанавливается динамическое равновесие. В растворителе, как и в воздухе, содержится влага, и специалисты стараются удерживать этот показатель на уровне относительной влажности воздуха в помещении химчистки. Таким образом, волокна ткани не накапливают избыточную воду и не набухают, но вместе с тем теряют не слишком много влаги и не пересыхают. При этом полярные загрязнения, захваченные мицеллами детергента, безвозвратно удаляются с одежды.

При содействии детергентов в процессе химической чистки неполярные растворители выводят неполярные, полярные и нерастворимые виды загрязнений, не причиняя вреда структуре материи. Затем одежду отжимают в центрифуге и сушат нагретым воздухом, чтобы удалить растворитель. Растворители стоят дорого и наносят ущерб окружающей среде, поэтому их собирают для повторного использования. Пары жидких растворителей конденсируются на охлажденных поверхностях, конденсат фильтруют и подвергают перегонке. При надлежащей регенерации растворителя одну и ту же порцию можно использовать многократно.





## 18.3 Батарейки и аккумуляторы

Последние достижения электроники произвели революцию в портативной технике — теперь радио, телефон, видеоплеер и компьютер можно носить с собой повсюду. Всем этим гаджетам нужны мобильные источники энергии — чаще всего электрические батарейки.

Батарейки накапливают энергию в химической форме, а когда требуется, отдают ее в виде электроэнергии. Эти замечательные устройства достойны отдельного обсуждения. Не имея видимых движущихся узлов, они каким-то образом проталкивают электроны по замкнутому контуру. С каждым годом аккумуляторы и батарейки совершенствуются — их разработчики неустанно трудятся над тем, чтобы повысить емкость, надежность и экологичность батареек и одновременно уменьшить их размер, вес и цену. Тем не менее пока аккумуляторы существенно ограничивают возможности использования электромобилей и портативных компьютеров.

### Как батарейка производит электричество

Электроны перемещаются в батарейке от положительного полюса к отрицательному за счет химической потенциальной энергии. Поскольку электростатические силы толкают электроны в противоположном направлении, батарейка должна совершать работу над движущимися электронами. Каждый раз, перемещая один электрон, батарейка тратит немного химической потенциальной энергии. После того как определенное число электронов переместится, запас химической потенциальной энергии иссякнет, и надо будет либо заменить батарейку, либо зарядить аккумулятор.

Но батарейка перестает перемещать электроны еще на полке, задолго до того, как исчерпает весь свой запас химической потенциальной энергии. При каждом акте переноса возрастают отрицательный заряд отрицательного полюса и положительный заряд положительного полюса. Одновременно с ростом зарядов на полюсах увеличивается и разность потенциалов в батарейке, и для перемещения очередного электрона требуется производить все большую работу. В конце концов электростатические силы становятся настолько большими, что батарейка не может перемещать электроны. Она лежит без дела, накопив на отрицательном полюсе отрицательный заряд, а на положительном — положительный, и может пребывать в таком состоянии чуть ли не вечно.

Однако если вы вставите батарейку в фонарик и включите его, электрический контур замкнет контакты (рис. 18.3.1). Электроны перетекают от отрицательного полюса к положительному через лампочку, и величина зарядов на полюсах падает. Батарейка снова начинает перекачивать электроны. Она подает электроны на отрицательный контакт, а лампочка возвращает их на положительный контакт.

**Рис. 18.3.1.** Простейший электрический контур, в котором батарейка поставляет энергию лампочке. Батарейка перекачивает электроны от положительного полюса к отрицательному и отдает каждому электрону долю химической потенциальной энергии. На обратном пути к положительному полюсу поток электронов проходит через лампочку. Электроны отдают энергию лампочке, а лампочка дает свет.

← Заполнение 1s-орбитали										Заполнение p-орбиталей →													
⑥ 1 H 2.1										⑧ 2 He													
← Заполнение s-орбитали										← Заполнение d-орбиталей →													
① 3 Li 1.0	② 4 Be 1.5											⑤ 5 B 2.0	⑥ 6 C 2.5	⑥ 7 N 3.0	⑥ 8 O 3.5	⑦ 9 F 4.0	⑧ 10 Ne						
① 11 Na 0.9	② 12 Mg 1.2											④ 13 Al 1.5	⑤ 14 Si 1.8	⑥ 15 P 2.1	⑥ 16 S 2.5	⑦ 17 Cl 3.0	⑧ 18 Ar						
① 19 K 0.8	② 20 Ca 1.0	③ 21 Sc 1.3	③ 22 Ti 1.5	③ 23 V 1.6	③ 24 Cr 1.6	③ 25 Mn 1.5	③ 26 Fe 1.8	③ 27 Co 1.9	③ 28 Ni 1.9	③ 29 Cu 1.9	③ 30 Zn 1.6	④ 31 Ga 1.6	⑤ 32 Ge 1.8	⑥ 33 As 2.0	⑥ 34 Se 2.4	⑦ 35 Br 2.8	⑧ 36 Kr						
① 37 Rb 0.8	② 38 Sr 1.0	③ 39 Y 1.2	③ 40 Zr 1.4	③ 41 Nb 1.6	③ 42 Mo 1.8	③ 43 Tc 1.9	③ 44 Ru 2.2	③ 45 Rh 2.2	③ 46 Pd 2.2	③ 47 Ag 1.9	③ 48 Cd 1.7	④ 49 In 1.7	⑤ 50 Sn 1.8	⑤ 51 Sb 1.9	⑤ 52 Te 2.1	⑦ 53 I 2.5	⑧ 54 Xe						
① 55 Cs 0.7	② 56 Ba 0.9	③ 57 La 1.1	③ 72 Hf 1.3	③ 73 Ta 1.5	③ 74 W 1.7	③ 75 Re 1.9	③ 76 Os 2.2	③ 77 Ir 2.2	③ 78 Pt 2.2	③ 79 Au 2.4	③ 80 Hg 1.9	④ 81 Tl 1.8	④ 82 Pb 1.9	④ 83 Bi 1.9	⑤ 84 Po 2.0	⑦ 85 At 2.2	⑧ 86 Rn						
① 87 Fr 0.7	② 88 Ra 0.9	③ 89 Ac 1.0	③ 104 Rf	③ 105 Db	③ 106 Sg	③ 107 Bh	③ 108 Hs	③ 109 Mt	③ 110 Ds	③ 111 Rg													
										← Заполнение f-орбиталей →													
										⑨ 58 Ce 1.1	⑨ 59 Pr 1.1	⑨ 60 Nd 1.2	⑨ 61 Pm	⑨ 62 Sm 1.2	⑨ 63 Eu	⑨ 64 Gd 1.1	⑨ 65 Tb 1.2	⑨ 66 Dy	⑨ 67 Ho 1.2	⑨ 68 Er 1.2	⑨ 69 Tm 1.2	⑨ 70 Yb 1.1	⑨ 71 Lu 1.2
										⑩ 90 Th 1.3	⑩ 91 Pa 1.4	⑩ 92 U 1.4	⑩ 93 Np 1.4	⑩ 94 Pu	⑩ 95 Am	⑩ 96 Cm	⑩ 97 Bk	⑩ 98 Cf	⑩ 99 Es	⑩ 100 Fm	⑩ 101 Md	⑩ 102 No	⑩ 103 Lr

- ① Щелочные металлы
- ② Щелочноземельные металлы
- ③ Переходные металлы
- ④ Постпереходные металлы
- ⑤ Полуметаллы
- ⑥ Неметаллы
- ⑦ Галогены
- ⑧ Благородные (инертные) газы
- ⑨ Лантаноиды
- ⑩ Actиноиды

**Рис. 18.3.2.** Периодическая система элементов Д. И. Менделеева. Элементы расположены по порядку атомных номеров (атомный номер указан в правом верхнем углу ячейки). По мере увеличения атомного номера заполняются разные электронные оболочки. Вид таблицы определяется порядком их заполнения. В правой колонке основной уровень заполнен целиком, а со следующего ряда начинается заселение следующего уровня. Число под символом элемента — это его электроотрицательность по Полингу.

Электроны непрерывно движутся по кругу, забирая энергию у батареек и отдавая ее лампочке до тех пор, пока не иссякнет запас химической потенциальной энергии или пока вы не выключите фонарик.

Каким образом батарейка использует химическую потенциальную энергию для перемещения электронов от положительного полюса к отрицательному? Во многих случаях работа батареек основана на том, что атомы одного элемента передают электроны атомам другого элемента. Разные атомы имеют разное сродство к электронам внешнего, или валентного, уровня, и акт перехода часто сопровождается выделением энергии. Лишившись одного из своих валентных электронов, которые удерживаются достаточно прочно, атом может отобрать электрон у другого атома, который не так сильно держит свои электроны внешнего уровня. Так электроны перемещаются от одних атомов к другим, и при этом выделяется какое-то количество потенциальной энергии. Это и есть главный источник энергии батареек.

Исходя из свойств химических веществ, можно выбрать наиболее подходящие для батареек. Свойства атомов находятся в строгой зависимости от числа их протонов и электронов. Эту зависимость можно проследить, например, по периодической системе элементов (рис. 18.3.2), как мы делали в разделе 14.2. В таблице Менделеева элементы выстраиваются в горизонтальные ряды согласно своему атомному номеру — количеству имеющихся в атоме протонов. Поскольку в целом атом нейтрален, то по атомному номеру можно судить о том, сколько у него электронов. Элемент с атомным номером 1 — это водород (H), с номером 2 — гелий (He) и так далее.

Как мы видели в разделе 14.2, своеобразный формат таблицы определяется тем, как атомные орбитали заполняются электронами. Согласно принципу Паули, электроны с одинаковыми спинами — условно направленными вверх или вниз — должны находиться на разных орбиталях. Сначала электроны заполняют орбитали с самой низкой энергией, далее все остальные по порядку, пока атом не наберет

нужное количество электронов. Электроны нескольких последних из заселенных орбиталей определяют основные химические свойства элемента, в частности поведение атома в батарее. Процесс заполнения орбиталей непрост, но нам достаточно знать некоторые основные правила.

Одним атомам хватает электронов, чтобы целиком заполнить главную электронную оболочку. Такие атомы чрезвычайно стабильны, своих электронов не отдают и чужих не просят. Это благородные газы: гелий (He), неон (Ne), аргон (Ar), криптон (Kr), ксенон (Xe) и радон (Ra), которые на **рис. 18.3.2** занимают самую правую вертикальную колонку.

У других атомов есть один-два электрона сверх того, что требуется для заполнения главной электронной оболочки, и они готовы расстаться с лишними электронами. Это щелочные металлы: литий (Li), натрий (Na), калий (K), рубидий (Rb), цезий (Cs) и франций (Fr) — и щелочноземельные металлы: бериллий (Be), магний (Mg), кальций (Ca), стронций (Sr), барий (Ba) и радий (Ra); на **рис. 18.3.2** вы найдете их в двух крайних слева колонках.

Но есть и такие атомы, которые почти заполнили основную оболочку и жаждут получить дополнительные электроны. В таблице они расположены в ее правой части, левее благородных газов. К этому классу относятся азот (N), кислород (O), сера (S) и галогены — фтор (F), хлор (Cl), бром (Br), йод (I) и астат (At).

Все остальные элементы занимают промежуточное положение. Хотя их основные электронные оболочки заселены лишь частично, они склонны к обмену электронами ради завершения нижних уровней. Элементы в длинных горизонтальных рядах от скандия (Sc) до цинка (Zn) называются переходными металлами; они различаются по степени заполнения нижнего электронного уровня. Элементы внизу таблицы (**рис. 18.3.2**), из рядов лантаноидов и актиноидов, называются редкоземельными элементами; их отличает друг от друга степень заполнения другого нижнего электронного уровня.

Многие из этих атомов играют важную роль в работе батареек. Главный критерий при отборе элементов для батареек — способность атомов притягивать электроны. Это свойство называется электроотрицательностью, и измерять ее можно по-разному. Например, с помощью шкалы электроотрицательности по Полингу, предложенной американским химиком Лайнусом Полингом (1901–1994). Чем сильнее атом притягивает электроны, тем выше его электроотрицательность по Полингу. Значения электроотрицательности меняются от 0,7 для цезия (Cs), который легко отдает электроны, до 4,0 для фтора (F), который удерживает их очень прочно. Электроотрицательности других элементов, рассчитанные по методу Полинга, приведены на **рис. 18.3.2**. Работа батарейки основана на переносе электронов от атомов с низкой электроотрицательностью к атомам с большой электроотрицательностью.

## Гальванический элемент

К сожалению, в действительности батарейки устроены сложнее. Для начала атомы в батарее не существуют сами по себе — они входят в состав твердого или жидкого вещества, что влияет на перенос зарядов между ними. Кроме того, электроны перемещаются от положительного полюса к отрицательному за счет выделяющейся при этом энергии, поэтому переходы электронов в батарее не должны быть хаотическими. Итак, в батарее идут несколько взаимосвязанных процессов. Для того чтобы понять, как именно они взаимодействуют, рассмотрим работу относительно простого источника питания.

На **рис. 18.3.3** изображена самая элементарная батарейка, изобретенная в 1836 году английским химиком Джоном Фредериком Даниелем (1790–1845). Батарейка состоит из гальванических элементов. Собственно батарейкой гальванический элемент Даниеля служить не может, но это одна из простейших моделей для изучения. Здесь используются два металла — медь и цинк. Медь более электроотрицательна, чем цинк, поэтому энергия в гальваническом элементе выделяется при переходе электронов от атомов цинка к атомам меди.

Гальванический элемент Даниеля состоит из двух металлических пластин, которые находятся в изолированных ячейках с раствором соли. Цинковая пластина погружена в водный раствор сульфата цинка. В этом растворе содержится

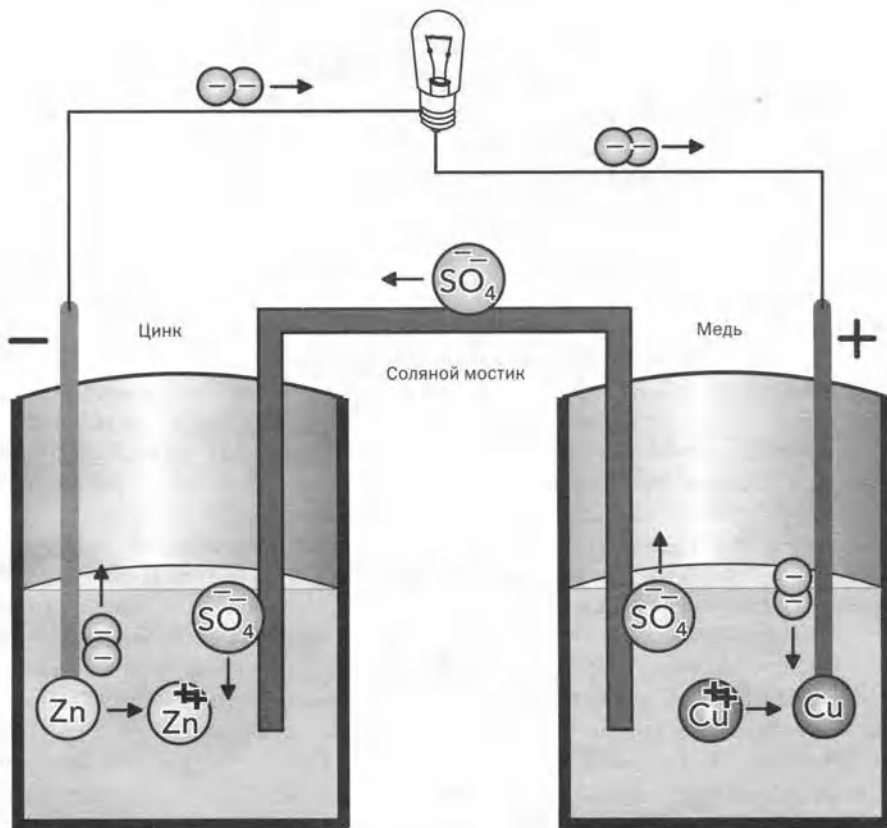
равное количество положительных ионов цинка ( $Zn^{2+}$ ) и отрицательных сульфат-ионов ( $SO_4^{2-}$ ), поэтому в целом среда нейтральная. Вторая пластина — медная — погружена в водный раствор сульфата меди. Во втором растворе содержится равное количество положительных ионов меди ( $Cu^{2+}$ ) и отрицательных сульфат-ионов ( $SO_4^{2-}$ ), и в целом среда также нейтральная.

Казалось бы, раз ячейки с растворами не сообщаются, их содержимое меняться не должно. Электроды не должны ни нарастать, ни истощаться, а растворы должны оставаться в первоначальном виде. Однако постоянство не подразумевает бездействия. На самом деле ионы цинка и меди непрерывно оседают на поверхности электродов и уходят с нее.

Растворимость ионов цинка и меди объясняется тем, что они поляризуют молекулы воды и те уносят их в раствор. Атомы цинка и меди, напротив, не поляризуют молекулы воды и в ней не растворяются. Следовательно, для того чтобы оторваться от электрода, атом должен оставить ему два электрона, стать ионом и перейти в воду. Аналогично вернуться на электрод может ион, который забрал у электрода два электрона и ушел из воды, превратившись в атом.

В изолированной ячейке такой обмен быстро приведет к состоянию химического равновесия, когда одинаковое количество электронов ежесекундно прибывает на электрод и уходит с него. Если ионы выходят из электрода в избытке, раствор приобретает положительный заряд и выталкивает ионы обратно к электроду. Если электрод поставляет мало ионов, в растворе накапливается отрицательный заряд, что стимулирует выход ионов с электрода. Эти компенсирующие процессы регулируют химическое равновесие. Ячейка сохраняет электрический нейтралитет.

Но ячейки, показанные на рис. 18.3.3, не изолированы — их соединяет соляной мостик. Это лоскут влажной ткани, который служит путепроводом для ионов и позволяет им переходить из одной ячейки в другую соответственно электрическим полям. И если ячейки хоть как-то обеспечивают разделение зарядов, то по мостику ионы мигрируют из одной ячейки в другую, уравнивая заряды. Коль скоро раствор соли в мостике проводит электрический ток путем перемещения ионов, он является электролитом. Растворы в обеих ячейках — тоже электролиты.



**Рис. 18.3.3.** Гальванический элемент функционирует за счет перехода электронов от атомов цинка к ионам меди. Ион меди ( $Cu^{2+}$ ) забирает у медного электрода два электрона и уходит из раствора в правой ячейке в виде атома меди ( $Cu$ ). Чтобы в растворе сохранилось равновесие зарядов, сульфат-ион ( $SO_4^{2-}$ ) переходит по соляному мостику в левую ячейку. Там сульфат-ион позволяет атому цинка ( $Zn$ ) отдать два электрона цинковому электроду и перейти в раствор в виде ионов цинка ( $Zn^{2+}$ ). Эти два электрона перемещаются по проводу к медному электроду, проходя через лампочку.

Электроды, растворы и соляной мостик в совокупности образуют электрохимический — гальванический — элемент. Если цинковый и медный электроды соединить проводом с лампочкой, гальванический элемент заработает. По образовавшемуся контуру пойдет ток. Контур состоит из гальванического элемента, проводов и лампочки. Гальванический элемент перекачивает электроны с медного электрода на цинковый, и они возвращаются на медный электрод через лампочку. Химическая потенциальная энергия превращается в гальваническом элементе в тепловую и в свет лампочки.

Чтобы лучше представить себе, как работает гальваническая ячейка, давайте пройдемся по контуру и проследим перемещения атомов, ионов и электронов. Начнем с медного электрода. Обстановка на его поверхности довольно оживленная, ионы меди то и дело приходят и уходят. Несмотря на высокое сродство к электронам ионов меди в соляном растворе, в среднем они не становятся атомами и не оседают на электроде, так как в противном случае электрод приобрел бы положительный заряд, а раствор соли — отрицательный.

Но допустим, что на медный электрод по присоединенному к нему проводу прибыло какое-то количество электронов. Приход отрицательного заряда сдвигает равновесие в этой ячейке, и еще сколько-то ионов меди возвращается на электрод. Эти ионы забирают электроны и оседают на электроде в виде атомов. Теперь атомов меди на электроде становится больше, чем было, а ионов меди в растворе — меньше.

После ухода ионов меди из раствора соли сульфат-ионы остаются в избытке, и раствор уже не нейтральный. Вот когда пригодится соляной мостик. Лишние сульфат-ионы переходят по мостику и покидают ячейку с медным электродом. Восстанавливается оптимальный баланс между сульфат-ионами и ионами меди, а также химическое равновесие в ячейке.

Однако сульфат-ионы не исчезли бесследно — они попали в ячейку с цинковым электродом и нарушили там химическое равновесие. На поверхности цинкового электрода тоже идет непрерывный обмен ионами цинка с раствором. Хотя атомы цинка на электроде слабее удерживают два своих валентных электрона, в среднем они не превращаются в ионы и не уходят в раствор, иначе в растворе скопился бы положительный заряд, а на электроде — отрицательный.

Прибывшие в ячейку с цинковым электродом по мостику избыточные сульфат-ионы нарушают баланс между ионами цинка и сульфат-ионами в растворе. Теперь лишние атомы цинка сбрасывают свои электроны и переходят в раствор в виде ионов. В ячейке с раствором соли быстро устанавливается ионное равновесие. Но тогда количество атомов цинка на электроде уменьшается по сравнению с прежним, а количество ионов цинка в растворе — увеличивается. При этом электрод приобретает отрицательный заряд. Электроны уходят с него по присоединенному проводу, и в ячейке восстанавливается химическое равновесие.

Электроны, покинувшие цинковый электрод, проходят через лампочку и вскоре попадают на медный электрод. Все начинается сначала. Следовательно, мы верно предположили, что на медный электрод поступают электроны, ибо именно туда гальванический элемент их и посылает. Итак, прибытие на медный электрод каждой пары электронов приводит к тому, что: (1) один ион меди превращается в атом и уходит из раствора сульфата меди, (2) один сульфат-ион перетекает по соляному мостику, (3) один атом цинка попадает в раствор сульфата цинка в виде иона, (4) два электрона покидают цинковый электрод.

На первый взгляд, весь этот многостадийный процесс сводится к поглощению двух электронов в одном проводе и высвобождению их в другом. Но энергия электронов, покидающих цинковый электрод, больше энергии той пары, что прибывает на медный электрод. Ион меди толкает к электроду два вновь прибывших электрона и совершает над ними работу. Атом цинка выталкивает два своих электрона и тоже совершает над ними работу. Вся эта работа передается посредством электрического поля двум электронам, которые уходят с цинкового электрода, в результате чего они получают дополнительную энергию. Они отдают ее лампочке, лампочка загорается, а электроны возвращаются на медный электрод и начинают следующий цикл.

Вы скажете, что уходят с цинкового электрода и приходят на медный разные пары электронов. Но электроны неразличимы, идентифицировать их невозможно. В общем и целом электроны движутся в гальваническом элементе от медного элект-

трода к цинковому. Поскольку цинковый электрод приобретает отрицательный заряд, он становится отрицательным полюсом батарейки, которая содержит в себе гальванический элемент. Медный электрод становится положительным полюсом.

Гальванический элемент не может вечно качать поток электронов. При переходе каждых двух электронов количество ионов меди в растворе сульфата меди и количество атомов цинка в цинковом электроде уменьшается на 1. Как только запас ионов меди или атомов цинка истощится, процесс прекратится. Батарейка полностью сядет.

Но гальванический элемент перестанет работать еще до того, как будут израсходованы последние ионы и атомы. Дело в том, что количество энергии, которое получает электрон в гальваническом элементе — напряжение гальванического элемента, — зависит от состояния последнего. Гальванический элемент характеризуется номинальным напряжением, но в зависимости от его состояния реальное напряжение может быть больше или меньше номинального. Напряжение нового гальванического элемента, скорее всего, будет выше номинального, а уже изрядно поработавшего — ниже.

Номинальное напряжение определяется общей химической потенциальной энергией, которая выделяется при переходе одного электрона с положительного полюса на отрицательный. В гальваническом элементе Даниеля химическая потенциальная энергия высвобождается, когда ион меди принимает два электрона и уходит из своего раствора и когда атом цинка теряет два электрона и переходит в раствор. Эта общая энергия достается двум перемещенным электронам, и полная энергия, деленная на заряд, — напряжение — составляет 1,10 В. Номинальное напряжение гальванического элемента Даниеля равно 1,10 В.

Напряжение нового гальванического элемента, когда ионов меди в растворе сульфата меди много, а ионов цинка в растворе сульфата цинка относительно мало, составляет примерно 1,20 В. Притом что из концентрированного раствора сульфата меди может уйти много ионов меди, а в разбавленный раствор сульфата цинка попадает много ионов цинка, хаотическое тепловое движение в неиспользованном гальваническом элементе помогает его работе и добавляет к его напряжению лишние 0,10 В. При перекачивании электронов в новом элементе значительно возрастает степень неупорядоченности системы, то есть энтропия, а термодинамические процессы, повышая напряжение, способствуют увеличению энтропии. Тепловая энергия служит источником дополнительной энергии.

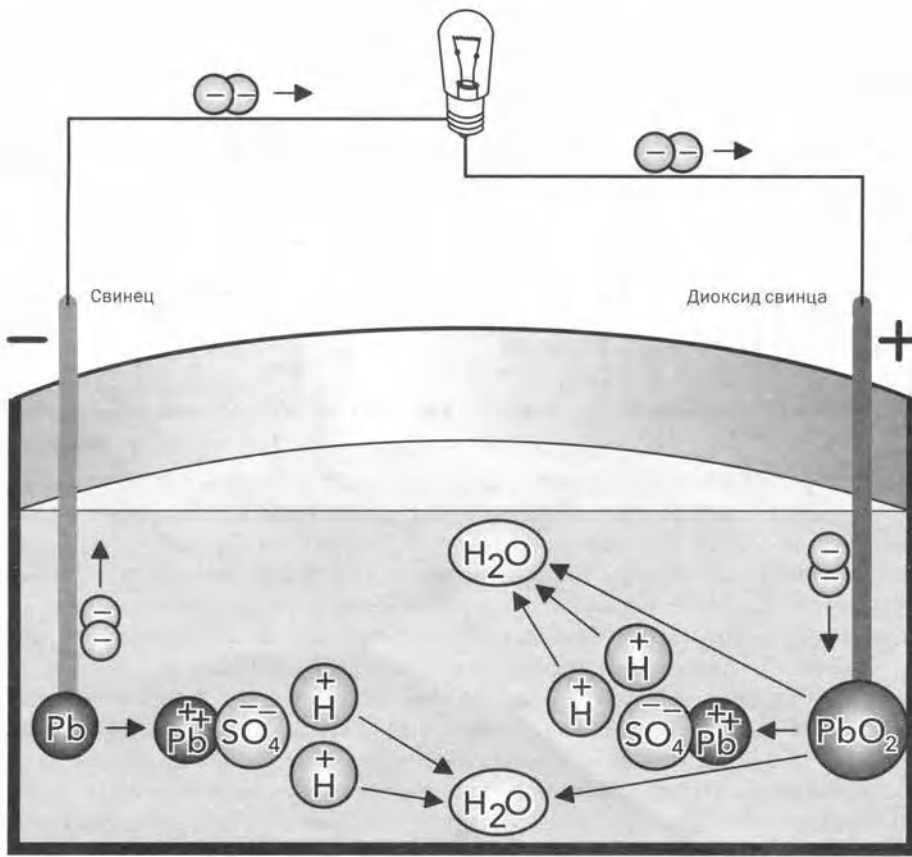
Если же гальванический элемент работал достаточно долго, в нем уже накопился изрядный запас неупорядоченности, его энтропия велика и термодинамические явления больше ему не помогут. Они даже мешают, превращая химическую потенциальную энергию в тепловую.

Чем дольше работает гальванический элемент, тем ниже его напряжение. Концентрация ионов меди в растворе сульфата меди падает, медному электроду все труднее восстанавливать немногочисленные ионы до атомов меди. Концентрация ионов цинка в растворе сульфата цинка растет, и цинковому электроду все труднее переводить атомы цинка в раствор в виде ионов. Когда концентрации ионов меди и ионов цинка в "родных" растворах сравняются, напряжение в гальваническом элементе достигнет стандартной величины 1,10 В. Когда химическая потенциальная энергия гальванического элемента растрачивается еще сильнее, его напряжение снижается до 1,00 В, 0,90 В и даже меньше, и в конце концов батарейка перестает работать.

## Свинцовый аккумулятор

Гальванический элемент Даниеля — простой и достойный внимания источник электроэнергии, но практической ценности он не имеет. Невозможно перекачивать слишком много электронов каждую секунду, или, что то же самое, поддерживать большой ток. Если поток электронов через батарею будет чересчур интенсивным, основная доля ее химической потенциальной энергии пойдет на обеспечение электрического тока в самой батарее, а покинувшим ее электронам достанется меньшая часть.

Вообще-то каждой батарее присуще некое внутреннее сопротивление. Из-за внутреннего сопротивления батареи при слишком большом токе в ней ее соб-



**Рис. 18.3.4.** Работа свинцового аккумулятора основана на сложной электрохимической реакции, в которой участвуют свинец, диоксид свинца и серная кислота, а образуются сульфат свинца и вода. Молекула диоксида свинца ( $\text{PbO}_2$ ) забирает у электрода из диоксида свинца два электрона и взаимодействует в растворе с четырьмя ионами водорода ( $\text{H}^+$ ) с образованием иона свинца ( $\text{Pb}^{2+}$ ) и молекулы воды ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Положительный заряд в растворе понижается на 2 единицы, поэтому атом свинца ( $\text{Pb}$ ) может отдать свинцовому электроду два электрона и превратиться в ион свинца. Эти два электрона пойдут по проводу к лампочке и далее к электроду из оксида свинца.

ственная химическая потенциальная энергия перейдет в тепловую. Батарея нагреется, а электроны будут выходить из отрицательного электрода с меньшим запасом энергии. Такой эффект можно заметить, если вставить в фонарик старую или дефектную батарейку. При большом внутреннем сопротивлении она израсходует большую часть своей энергии впустую, и лампочка будет светиться тускло.

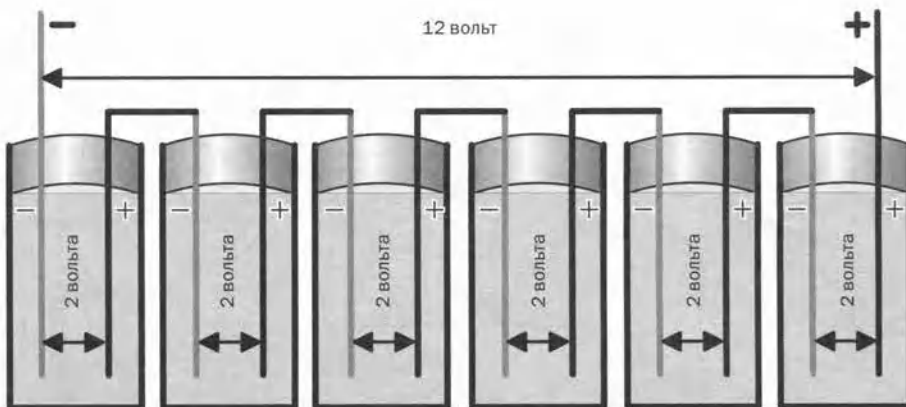
Чтобы завести машину, требуется ток огромной силы, гораздо больше, чем можно получить с помощью гальванического элемента. Поэтому в автомобиле используется свинцовая аккумуляторная батарея. Ее химические ячейки во многом напоминают гальванический элемент — отличие в том, что электроды другие, а емкость с жидкостью общая (**рис. 18.3.4**).

Ячейка аккумулятора заполнена водным раствором серной кислоты ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). Молекулы серной кислоты диссоциируют в воде на положительные ионы водорода ( $\text{H}^+$ ) и отрицательные сульфат-ионы ( $\text{SO}_4^{2-}$ ). Поскольку ион водорода несет единичный положительный заряд, а сульфат-ион — двойной отрицательный, в нейтральном растворе содержится вдвое больше ионов водорода, чем сульфат-ионов.

Отрицательный электрод в ячейке сделан из пористого металлического свинца, помещенного в решетку из инертного сплава свинца. Положительный электрод сделан из диоксида свинца, также помещенного в защитную решетку из сплава свинца. Электрохимический процесс переноса электронов от диоксидного электрода к металлическому более сложен, чем в гальваническом элементе Даниеля, но вполне доступен для понимания.

Начнем с диоксидного электрода. Давайте еще раз допустим, что на электрод, сделанный из диоксида свинца, прибыли два электрона. Молекула диоксида свинца захватывает их и вступает в реакцию с четырьмя ионами водорода и сульфат-ионом с образованием молекулы сульфата свинца и двух молекул воды. В молекулу сульфата свинца входят положительно заряженный ион свинца и отрицательно заряженный сульфат-ион, но это вещество не растворяется в воде — ионы связаны так прочно, что молекулы воды не в силах их разъединить и унести в раствор. Твердый сульфат свинца адсорбируется на диоксидном электроде.

Рис. 18.3.5. Автомобильный аккумулятор дает напряжение 12 В за счет прохождения тока по 6 изолированным свинцово-кислотным ячейкам. Каждая ячейка обеспечивает по 2 В.



Итак, из раствора в ячейке ушли четыре иона водорода и один сульфат-ион. Положительных ионов потеряно больше, чем отрицательных, а восстановить равновесие можно, если избавиться еще от одного сульфат-иона. Поэтому атом свинца на свинцовом электроде отдает два электрона и вместе с сульфат-ионом образует сульфат свинца. Молекула нерастворимого сульфата свинца оседает на электроде из металлического свинца. Равновесие в растворе восстановлено, хотя и ценой значительного сокращения числа ионов по сравнению с исходным.

Два электрона, высвобожденные атомом свинца в процессе его взаимодействия с сульфат-ионом, идут по проводу к лампочке и возвращаются на диоксидный электрод, где начинается новый цикл. В общем и целом приход каждых двух электронов на электрод из диоксида свинца влечет за собой следующие реакции: (1) одна молекула диоксида свинца реагирует с четырьмя ионами водорода и сульфат-ионом с образованием молекулы твердого сульфата свинца и двух молекул воды; (2) один атом свинца превращается в ион свинца и образует с сульфат-ионом одну молекулу нерастворимого сульфата свинца; (3) два электрона покидают металлический электрод.

Энергия электронов, ушедших со свинцового электрода, больше энергии электронов, которые пришли на электрод из диоксида свинца. При небольшой химической потенциальной энергии сульфат свинца химически очень устойчив. Электрохимическая реакция образования сульфата свинца идет с выделением большого количества энергии, и эта энергия передается в ячейке переносимым электронам. Номинальное напряжение ячейки составляет 2,04 В.

Напряжение ячейки свинцового аккумулятора, как и напряжение любой батареи, зависит от срока его службы. По мере расходования ионов водорода и сульфат-ионов в растворе напряжение падает. Ячейка устроена так, что термодинамические эффекты не могут поднять напряжение нового аккумулятора выше номинального, но могут понизить напряжение изношенной ячейки. Напряжение ячейки нового аккумулятора — примерно 2,03 В, а разряженного — примерно 2,00 В.

Концентрация раствора в ячейке аккумулятора также уменьшается, равно как и запас ее энергии. Плотность серной кислоты, источника ионов водорода и сульфат-ионов, больше плотности воды. С помощью прибора, который называется ареометр, можно измерить плотность раствора, по плотности определить концентрацию ионов водорода и сульфат-ионов и сделать вывод о состоянии ячейки.

Автомобильная свинцовая аккумуляторная батарея имеет три интересные особенности. Во-первых, это не двухвольтовая батарея, а двенадцативольтная. Во-вторых, она работает многие годы, прежде чем окончательно откажет. В-третьих, когда вы заводите автомобиль с ее помощью, она дает очень большой ток. Что же в ней происходит?

На самом деле 12-вольтовый автомобильный аккумулятор состоит из 6 отдельных, последовательно соединенных свинцово-кислотных гальванических элементов (рис. 18.3.5). Электроны переносятся в каждой ячейке по очереди, и на выходе из шестой ячейки их энергия намного выше, чем была в первой. В итоге разница потенциалов между отрицательным и положительным полюсами аккумулятора равна 12 В. В некоторых моделях автомобилей и мотоциклов используются 6-вольтовые аккумуляторы с тремя ячейками вместо шести.



Автомобильная аккумуляторная батарея служит так долго потому, что автомобиль постоянно подзаряжает ее. В электросистему машины входит генератор электрического тока, который превращает совершенную двигателем механическую работу в электроэнергию. Часть этой электроэнергии расходуется на повышение химической потенциальной энергии аккумулятора. При нормальном функционировании всех узлов аккумулятор непрерывно набирает полный запас энергии.

Подзарядка происходит, когда электрохимический процесс поворачивается вспять. Внешний источник подает электроэнергию, и все этапы идут в обратном порядке. Два электрона попадают на свинцовый электрод, там ион свинца, который входит в молекулу сульфата свинца, забирает их и превращается в атом свинца. Диоксидный электрод выпускает два электрона, и молекулы сульфата свинца реагирует с водой, образуя молекулу диоксида свинца, четыре иона водорода и сульфат-ион. Эти ионы также переходят в раствор, который заполняет ячейку.

В процессе подзарядки сульфат свинца постепенно превращается на электродах в свинец и диоксид свинца. Концентрации водородных и сульфат-ионов в растворе медленно уменьшаются. В конце концов ячейка возвращается в первоначальное состояние, когда раствор серной кислоты был крепким, а сульфата свинца на электродах было мало.

Разрушение очень прочной молекулы сульфата свинца требует энергии, и ее обеспечивает внешний источник. Энергия из этого источника в основном идет на восстановление исходных активных компонентов в ячейке. Но небольшое ее количество теряется в виде тепловой энергии. За потери восстанавливающей энергии отвечает термодинамика — это по ее законам увеличиваются хаос и энтропия во Вселенной. Чем быстрее вы стараетесь зарядить аккумулятор, тем сильнее сказываются термодинамические явления и тем больше энергии пропадет зря. Работающий аккумулятор возвращает только 75–85% той электроэнергии, которая используется на его подзарядку.

Аккумулятор так легко зарядить благодаря тому, что у него твердые электроды — атомы свинца никуда из них не уходят. Поскольку электроды не теряют формы, им не нужно восстанавливаться во время подзарядки. Надо только переправить сульфат-ионы с электродов обратно в раствор. В батареях других типов один из электродов может раствориться, если батарея сядет. Такие батареи подзарядке не подлежат, поскольку безвозвратно теряют структуру своих электродов.

Хорошо развитая поверхность электродов в ячейках позволяет получить большой ток, необходимый для запуска двигателя. Поверхность электродов, сделанных из пористых свинца и диоксида свинца, далеко не гладкая. Бесчисленные извилины и расщелинки обеспечивают огромную площадь поверхности, на которой протекают электрохимические реакции. Кроме того, в каждой ячейке автомобильного аккумулятора имеется не менее десятка электродных пластин. Отрицательные (свинцовые) и положительные (диоксидные) пластины чередуются, образуя многослойную структуру. Чтобы пластины не соприкасались, их разделяют пористым изолятором. Все отрицательные пластины соединены проводами и работают одновременно. Точно так же соединены положительные пластины. В каждой ячейке с раствором серной кислоты задействована очень большая совокупная поверхность, способная дать очень большой ток даже при холодном аккумуляторе, когда тепловое движение ионов замедляется. При маленьком внутреннем сопротивлении ячейки на тепловую энергию расходуется лишь незначительная часть химической потенциальной энергии. Хороший автомобильный аккумулятор способен дать ток силой более 400 А при разности потенциалов между отрицательным и положительным полюсами 12 В. В этом случае аккумулятор передает стартеру 4800 Вт мощности (12 В × 400 А). Неудивительно, что машина заводится в ту же секунду!

Безусловно, аккумулятор не вечен. Постоянные разрядки и подзарядки постепенно приводят к повреждению электродов — они могут прийти в соприкосновение или упасть на дно емкости. Мешает и электролиз воды — процесс разложения ее на молекулярные водород и кислород, который портит рабочую жидкость. Электролиз обычно происходит во время зарядки аккумулятора. Как правило, из-за этого приходится время от времени подливать в аккумулятор воду. Электроды аккумуляторов, “не требующих технического обслуживания”, содержат кальций. Кальций в значительной степени тормозит процесс электролиза при подзарядке и замедляет расходование воды.

Однако батарейки с жидкостью внутри не всегда удобны. Многие бытовые приборы работают на “сухих” батарейках. В них может присутствовать вода, но не в жидком виде, а в составе пасты. Самые распространенные типы “сухих” батареек, один из которых мы сейчас рассмотрим, — угольно-цинковые, щелочные (“алкалиновые”), никель-кадмиевые и литиевые.

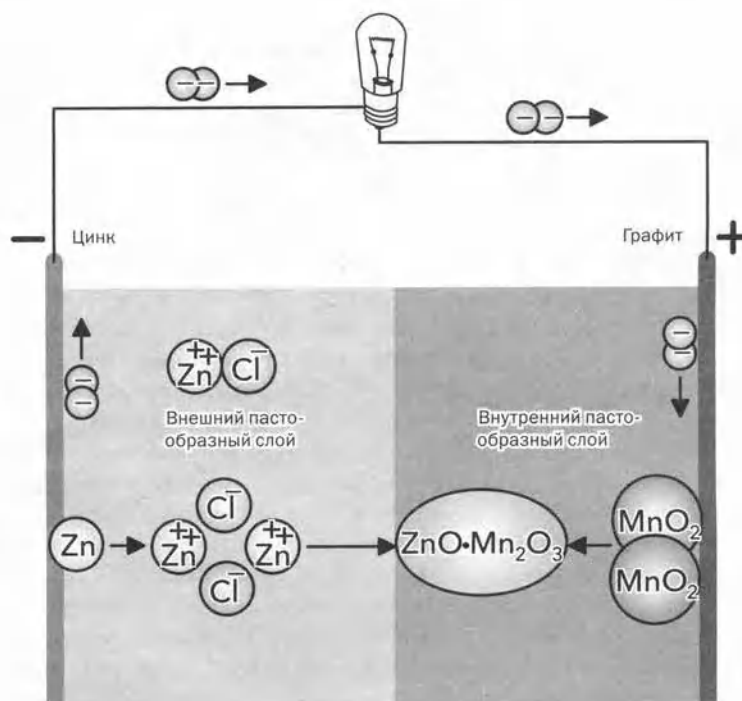
Угольно-цинковые батарейки бывают двух типов — с хлоридом аммония и с хлоридом цинка. Многие годы химические вещества высокой чистоты были очень дороги, и угольно-цинковые батарейки делали на основе хлорида аммония. Эти системы нечувствительны к примесям, поэтому для производства батареек годился сырой материал, полученный прямо из руды.

Но для своих размеров и веса такие некачественные батарейки обладали слишком маленьким запасом энергии. Кроме того, к концу работы реагентов электролит мог вытечь и повредить прибор. В последние годы технологии очистки химикатов стали более совершенными, и теперь в батарейках, рассчитанных на усиленную эксплуатацию, используется хлорид цинка. При тех же величине и весе, что и у хлоридно-аммониевой батарейки, хлоридно-цинковая обеспечивает больше энергии и вряд ли протечет. Но для того чтобы электрохимические реакции пошли по правильному пути, нужны реагенты высокой степени чистоты. Нас интересует система на основе хлорида цинка.

В солевой батарейке с хлоридом цинка (рис. 18.3.6) цилиндрический графитовый электрод окружен слоем пастообразного диоксида марганца ( $\text{MnO}_2$ ), затем пастообразным хлоридом цинка и в завершение накрыт, как колпачком, цинковым электродом. Диоксидные пасты содержат воду, поэтому хлорид цинка диссоциирует на ионы цинка ( $\text{Zn}^{2+}$ ) и ионы хлора ( $\text{Cl}^-$ ).

Энергия батарейки обусловлена способностью диоксида марганца отдавать часть атомов кислорода, а атомов цинка — превращаться в ионы. На самом деле в батарейке происходит несколько реакций, но все они работают на перенос электронов от графитового электрода к цинковому. Рассмотрим одну из самых простых реакций.

В этом процессе две молекулы диоксида марганца ( $\text{MnO}_2$ ) во внутреннем пастообразном слое забирают у химически инертного графитового электрода два электрона. Затем эти молекулы реагируют с ионом цинка ( $\text{Zn}^{2+}$ ), образуя молекулу сложного состава — цинк-марганцевый оксид ( $\text{ZnO}\cdot\text{Mn}_2\text{O}_3$ ). Положительный



**Рис. 18.3.6.** В солевой угольно-цинковой батарейке две молекулы диоксида марганца ( $\text{MnO}_2$ ) забирают у графитового электрода два электрона и вступают в реакцию с ионами цинка, продуктами которой являются молекула двойного оксида цинка с марганцем ( $\text{ZnO}\cdot\text{Mn}_2\text{O}_3$ ). Положительные заряды в пастообразных веществах уменьшаются на 2, то есть атом цинка ( $\text{Zn}$ ) может отдать цинковому электроду два электрона и превратиться в ион цинка ( $\text{Zn}^{2+}$ ). Эти два электрона идут по проводам к лампочке и угольному электроду.

заряд пастообразного слоя уменьшился на 2 единицы, поэтому атом цинка (Zn) получает возможность отдать два электрона и перейти в пасту в виде иона цинка ( $Zn^{2+}$ ). Эти два электрона идут по проводам к лампочке, далее к графитовому электроду — и все начинается сначала.

На рис. 18.3.6 не показана другая важная реакция — взаимодействие цинка и хлорида цинка с водой, в результате которого образуется твердый оксихлорид цинка ( $ZnCl_2 \cdot 4Zn(OH)_2 \cdot H_2O$ ). Значение этой реакции очень велико, так как в ней участвует вода, которая входит в состав электролита. Когда иссякнет запас химической потенциальной энергии, вода тоже израсходуется, и электролит не вытечет в ваш фонарик.

Номинальное напряжение угольно-цинковой батарейки — 1,5 В, но ей присуще большое внутреннее сопротивление. Она не может перекачивать много электронов в секунду, особенно на холоде, поэтому в тех случаях, когда требуется большой ток, она малоэффективна. К тому же ее нельзя зарядить заново. Цинковый электрод постепенно переходит в раствор, в пастообразный слой, и обратный ток не может его восстановить. И все-таки угольно-цинковые батарейки давно и широко применяются и во многих случаях по-прежнему остаются самым дешевым источником энергии. На них работают бытовые электрические приборы, которые потребляют мало энергии, — например, пульты дистанционного управления для телевизоров.

Электрохимическая ячейка щелочной батарейки устроена несколько сложнее. Внешне щелочные батарейки ничем не отличаются от угольно-цинковых, но в них протекают иные электрохимические процессы (рис. 18.3.7). Достаточно сказать, что по сравнению с угольно-цинковой батарейкой щелочная как бы вывернута наизнанку. Положительный электрод, сделанный из графита с диоксидом марганца, расположен по краям, а электрод из цинкового порошка — в средней части элемента. Другое принципиальное отличие заключается в наличии только одной пасты — смеси гидроксида калия (KOH) с водой. Гидроксид калия диссоциирует на ионы калия ( $K^+$ ) и гидроксильные ионы ( $OH^-$ ). Обилие гидроксильных ионов в пасте обуславливает щелочную реакцию.

Порошковый цинковый электрод в середине батарейки обеспечивает большую площадь поверхности и увеличивает число электронов, которые переносятся за секунду. Из-за своего малого внутреннего сопротивления щелочные батарейки эффективно превращают химическую потенциальную энергию в полезную электроэнергию. Вода, как и в угольно-цинковой батарейке, расходуется в побочной реакции, поэтому щелочные батарейки не вытекают при длительном использовании.

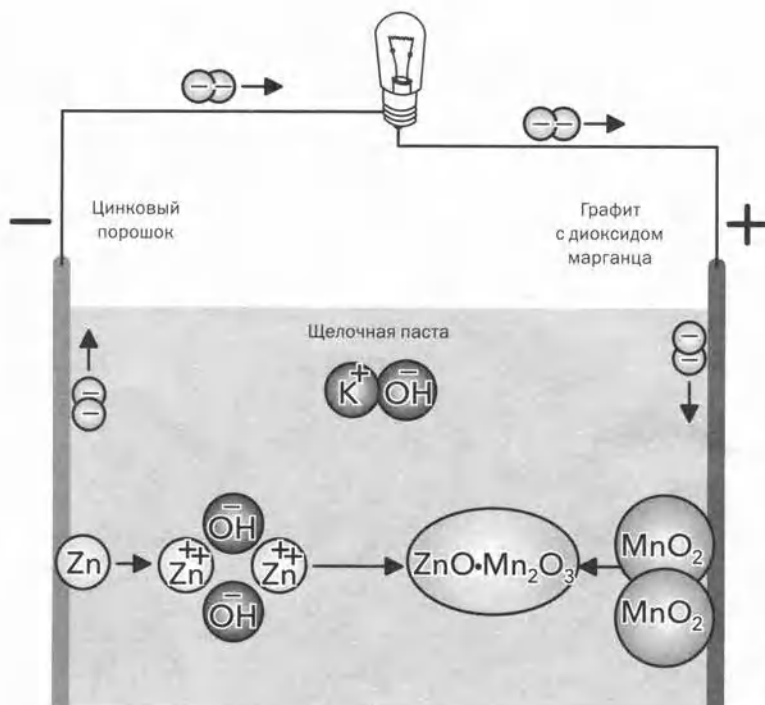


Рис. 18.3.7. Электрохимические реакции в щелочной батарейке подобны тем, что протекают в солевых угольно-цинковых, только в пастообразном электролите содержатся положительные ионы калия ( $K^+$ ) и гидроксильные ионы ( $OH^-$ ). Цинковый порошковый электрод, обычно расположенный в средней части элемента, обеспечивает большую площадь поверхности, необходимую для приборов, которые эксплуатируются при высоком токе.

❶ Железо ржавеет на воздухе, если на него попадает вода, в результате электрохимического процесса. На границе водяной капли молекулы газообразного кислорода забирают у железа электроны и в результате реакции с водой образуют гидроксильные ионы ( $\text{OH}^-$ ). Эти ионы вынуждают атомы железа, расположенные ближе к середине капли, отдать два электрона и перейти в каплю в виде ионов железа ( $\text{Fe}^{2+}$ ). Продукт реакции — гидроксид железа, который и оседает слоем ржавчины на поверхности. Электроны протекают по железу к границам капли, и процесс возобновляется.

К сожалению, щелочные батарейки очень чувствительны к посторонним примесям. Цинковый электрод легко корродирует, поэтому степень чистоты реагентов должна быть достаточно высокой. Еще об электрохимической коррозии см. ❶. Повысить коррозионную устойчивость цинкового электрода и сохранить в порошковой массе электрическую связь можно, сплавив цинк с ртутью при содержании последней несколько десятых процента. Порошок такого сплава работает лучше чистого цинкового, но ртуть токсична и опасна для окружающей среды. В наше время ее редко используют в щелочных батарейках по экологическим причинам.

Щелочные батарейки бывают двух видов — ртутно-цинковые (с оксидом ртути) и серебряно-цинковые (с оксидом серебра). И те и другие в основном схожи с обычным щелочным элементом, изображенным на рис. 18.3.7, но вместо электрода из графита и оксида марганца ( $\text{MnO}_2$ ) используется электрод из оксида ртути ( $\text{HgO}$ ) или оксида серебра ( $\text{AgO}$ ).

Кислород обладает большой электроотрицательностью, поэтому атомы кислорода в этих молекулах почти полностью оттягивают на себя два электрона от ртути и серебра. Однако электроотрицательность ртути и серебра тоже высока, и они тоже стремятся получить электроны. Молекулы оксидов ртути и серебра могут взять электроны у положительного полюса батарейки и передать свои кислородные атомы ионам цинка ( $\text{Zn}^{2+}$ ), чтобы образовался оксид цинка ( $\text{ZnO}$ ), и атомам ртути ( $\text{Hg}$ ) или серебра ( $\text{Ag}$ ). Когда атом цинка отдает два электрона цинковому электроду, недостающий ион цинка возвращается.

В результате несложных электрохимических процессов в ртутно- и серебряно-цинковых батарейках происходит превращение одних твердых веществ в другие твердые вещества. Концентрация ионов в электролите не меняется, поэтому термодинамические эффекты не влияют на напряжение работающей батарейки. Номинальное напряжение ртутной батарейки 1,35 В, а серебряно-цинковой — 1,5 В. В противоположность угольно-цинковым и щелочным батарейкам, напряжение которых со временем падает, номинальное напряжение батареек с оксидами ртути или серебра сохраняется почти до полного их истощения. Благодаря стабильности напряжения они подходят для часов, слуховых аппаратов и кардиостимуляторов.

Несмотря на то, что напряжение всех перечисленных сухих гальванических элементов лежит в интервале от 1,35 до 1,5 В, батареи на их основе дают более высокое напряжение. Просто в этих высоковольтных батареях объединены несколько индивидуальных гальванических элементов. Самые распространенные 9-вольтовые батареи, которые используются во многих электробытовых приборах, на самом деле содержат шесть крошечных угольно-цинковых или щелочных эле-

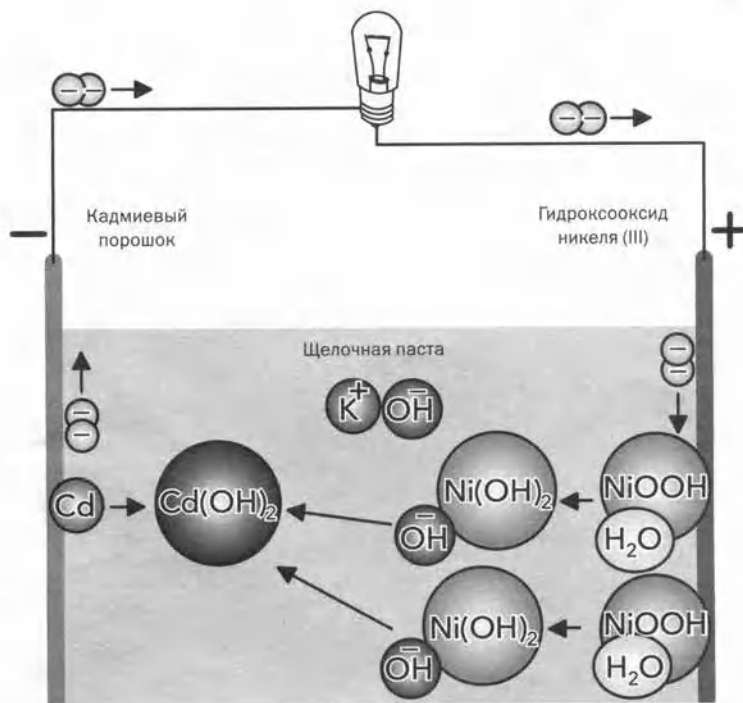


Рис. 18.3.8. В никель-кадмиевом аккумуляторе твердый гидроксооксид трехвалентного никеля ( $\text{NiOOH}$ ) вступает в реакцию с водой ( $\text{H}_2\text{O}$ ) и одним электроном с образованием твердого гидроксида двухвалентного никеля ( $\text{Ni(OH)}_2$ ) и иона гидроксила ( $\text{OH}^-$ ). Когда образуются два новых гидроксильных иона, атом кадмия ( $\text{Cd}$ ) отдает кадмиевому электроду два электрона и реагирует с гидроксильными ионами, образуя гидроксид кадмия ( $\text{Cd(OH)}_2$ ).

ментов. Маленькие ячейки не могут обеспечить достаточный поток электронов, прежде чем исчерпают свой запас химической потенциальной энергии. Однако благодаря совместной работе всех ячеек каждый электрон получает шестикратную энергию по сравнению с тем, что дает ему один гальванический элемент. Поэтому батарея с несколькими гальваническими элементами перекачивает меньше электронов при более высокой энергии одного электрона.

## Другие типы батарей

Еще два популярных типа батарей — никель-кадмиевый и литиевый перезаряжаемые аккумуляторы. Принцип работы первого основан на готовности атомов никеля взаимодействовать с другими атомами. Никель может отдавать для связей два или три своих электрона и образовывать устойчивые соединения. Подобную реакционную способность проявляют и другие вещества, в частности марганец, который присутствует в угольно-цинковых и щелочных гальванических элементах.

Атом никеля может отдать для образования связи с атомом кислорода (O) и гидроксильным радикалом (OH) три своих валентных электрона. В результате получается гидроксооксид (или метагидроксид) трехвалентного никеля ( $\text{NiOOH}$ ). Два электрона никель делит с атомом кислорода и один — с гидроксильной группой (OH). Кроме того, никель может пожертвовать два валентных электрона и образовать связь с двумя гидроксильными радикалами. В этом случае образуется гидроксид двухвалентного никеля ( $\text{Ni(OH)}_2$ ). Эти соединения различаются количеством атомов водорода.

В никель-кадмиевом аккумуляторе (рис. 18.3.8) твердый гидроксооксид трехвалентного никеля ( $\text{NiOOH}$ ) забирает у положительного электрода один электрон и при участии одной молекулы воды превращается в твердый гидроксид двухвалентного никеля ( $\text{Ni(OH)}_2$ ) с выделением иона гидроксила ( $\text{OH}^-$ ). Две такие реакции дают два гидроксильных иона. Наличие двух добавочных отрицательных зарядов в щелочном электролите приводит к тому, что атом кадмия (Cd) отдает два электрона отрицательному электроду с образованием твердого гидроксида кадмия ( $\text{Cd(OH)}_2$ ). И эти два электрона, как водится, идут по проводу к лампочке и вскоре объявляются на положительном никель-гидроксидном электроде.

Атомы кислорода и гидроксильные радикалы делят электроны с атомами никеля и кадмия не совсем честно. Они так яростно оттягивают на себя электроны, что атомы никеля и кадмия почти превращаются в ионы. Но никель более электроотрицателен, чем кадмий. Никель-кадмиевый аккумулятор генерирует энергию за счет передачи электронов от кадмия никелю. Когда от положительного электрода к отрицательному перемещаются два электрона, атом кадмия отдает два электрона, а два атома никеля возвращают себе по одному. Химической потенциальной энергии, которая выделяется в этой электрохимической реакции, достаточно для обеспечения номинального напряжения около 1,2 В.

Никель-кадмиевый аккумулятор особенно хорош тем, что его можно заряжать заново много раз. Если к кадмиевому электроду подвести электроны, а у электрода из гидроксооксида трехвалентного никеля отнять их, электрохимические реакции пойдут в обратную сторону. В процессе зарядки и разрядки оба электрода остаются твердыми. Пока аккумулятор работает, его положительный электрод из гидроксооксидного с трехвалентным никелем превращается в гидроксидный с двухвалентным никелем, а на отрицательном электроде металлический кадмий превращается в гидроксид кадмия. Во время подзарядки все происходит наоборот. Твердые электроды всегда сохраняют первоначальную форму, и вы можете многократно заряжать и разряжать аккумулятор, прежде чем он выйдет из строя.

Никель-кадмиевые аккумуляторы часто делают в виде рулета с начинкой — это позволяет уменьшить их внутреннее сопротивление и получить большой ток. Длинную ленту изоляционного материала покрывают сначала тонким слоем порошкового гидроксооксида трехвалентного никеля (это положительный электрод), затем тонким слоем пористого изолятора, пропитанного щелочным электролитом (гидроксидом калия), и наконец тонким слоем порошка из металлического кадмия (это отрицательный электрод). Все это вместе наматывают на цилиндрическую основу, чтобы получился многослойный цилиндр. Этот цилиндр вставляют в корпус аккумулятора, присоединив к полюсам батареи по

проводу и закрыв всю конструкцию клапанами, которые не дают выделяющимся при зарядке аккумулятора газам прорвать оболочку.

Впрочем, никель-кадмиевые аккумуляторы не лишены недостатков. Они дают только 1,2 В против 1,5 В, которые обеспечивают угольно-цинковые и щелочные батарейки, притом что не все приборы надежно функционируют при пониженном напряжении. Более того, никель-кадмиевый аккумулятор работает лучше, если его электроды представляют собой тонкодисперсный порошок. Но загвоздка в том, что свойства такого порошка со временем меняются. Если вы начнете заряжать частично разряженный аккумулятор, отдельные частицы порошка, состоящего из металлического кадмия и его гидроксида, могут увеличиться в размерах. И если повторить цикл неполной разрядки и подзарядки несколько раз подряд, образуются довольно крупные частицы.

С укрупнением частиц связан эффект памяти — явление снижения емкости аккумулятора, который разрядился до более низкого уровня, чем тот, при котором его обычно заряжают. На этом уровне запас мелких частиц кадмия обычно заканчивается и остаются только крупные, менее эффективные. Эффект памяти обычно удается компенсировать, полностью разрядив аккумулятор перед повторной зарядкой. Полагают, что при полном прохождении цикла крупные частицы разрушаются и общая эффективность аккумулятора повышается.

Еще один минус никель-кадмиевых аккумуляторов — токсичность кадмия. Никель-кадмиевые аккумуляторы следует не выбрасывать, а сдавать на переработку. В последние годы производители стали делать отрицательные электроды перезаряжаемых никелевых батарей не из кадмия, а из других материалов. Никель-металлгидридные аккумуляторы не имеют проблем с памятью и более экологичны.

Литиевые батареи генерируют энергию благодаря чрезвычайно низкой гетероотрицательности лития. Литий так легко расстается с электронами, что готов вступить в реакцию с очень многими химическими соединениями. Он бурно реагирует с водой, поэтому в литиевых батареях вместо водных электролитов используются различные органические растворители и литиевые соли.

Литиевая батарея устроена примерно так же, как те, которые мы только что рассмотрели. Отрицательный электрод сделан из металлического лития, а положительный — из какой-нибудь соли или пластмассы, способных вступить в реакцию с атомами лития. Электроны вынуждают соль или пластмассу высвобождать отрицательно заряженные ионы, которые взаимодействуют с металлическим литием и образуют соли лития. В ходе последней стадии атомы лития отдают электроны и превращаются в ионы лития. В итоге происходит перенос электронов от положительного полюса к отрицательному.

Высокой реакционной способности лития соответствует значительная химическая потенциальная энергия. Номинальное напряжение литиевых батарей нередко составляет 3 В и больше. Кроме того, литий — один из самых легких химических элементов, с очень легким ядром в центре атома, поэтому литиевые батареи хранят огромный запас химической потенциальной энергии в очень легкой упаковке. Это идеальные источники тока для часов и фотоаппаратов, когда важен малый вес. О необычной разновидности обычных батареек см. ②.

② На космических летательных аппаратах используются топливные элементы — особый вариант батареек с газообразными активными компонентами на положительном и отрицательном электродах. Как правило, в типичных топливных элементах идет процесс, обратный электролізу. На положительный электрод подается газообразный кислород, а на отрицательный — газообразный водород. В электрохимической реакции на платиновом или другом катализаторе эти газы превращаются в воду. При этом с положительного электрода к отрицательному переносятся электроны. Сейчас ведутся исследования, цель которых — удешевить топливные ячейки и/или заменить водород на другие виды топлива. И есть все основания надеяться, что во многих ситуациях удастся заменить нынешние аккумуляторы такими топливными ячейками.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А НЕМНОГО МАТЕМАТИКИ

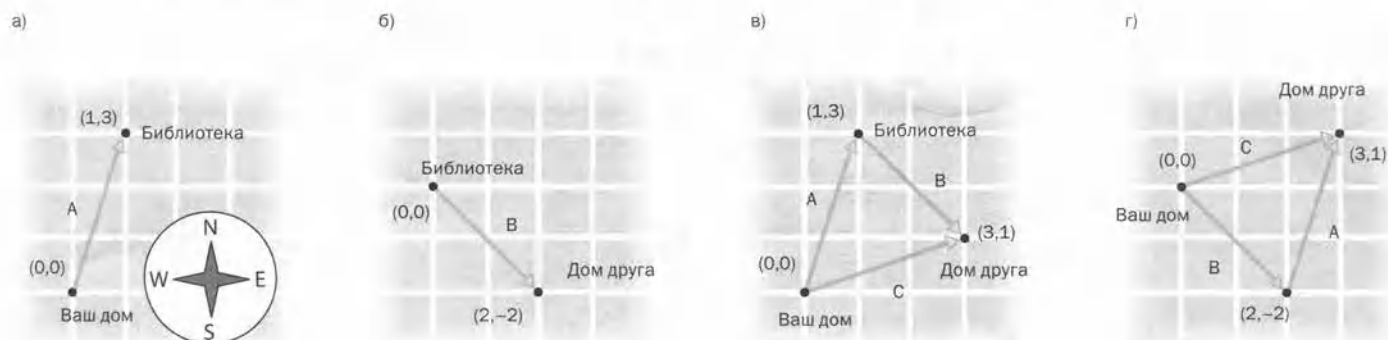
В физике немало векторных величин — таких, которые характеризуются модулем (численным значением) и направлением. К ним относятся, в частности, радиус-вектор, скорость, ускорение, сила, момент силы, импульс, момент импульса, а также напряженность электрического и магнитного поля. Пожалуй, проще всего представить себе радиус-вектор, так как с его помощью описывается положение тела — расстояние до него от точки отсчета и направление измерения этого расстояния. Например, вы можете задать радиус-вектор библиотеки относительно вашего дома, указав расстояние от дома до библиотеки (скажем, 3,162 км) и направление движения к ней (18,43° восточнее северного направления). Для того чтобы найти путь от вашего дома до библиотеки, достаточно знать ее радиус-вектор.

На иллюстрациях — как на **рис. А.1** — векторные величины изображены в виде стрелок. Длина стрелки показывает модуль вектора, а острие — направление вектора. Допустим, в городе, где вы живете, главные улицы пролегают с востока на запад или с севера на юг на расстоянии 1 км друг от друга. На **рис. А.1** приведены четыре плана вашего города. Вектор **A** на **рис. А.1, а**, — это радиус-вектор библиотеки относительно вашего дома. Начало его — у вашего дома, конец — у библиотеки, и таким образом заданы величина и направление радиус-вектора библиотеки.

Рассмотрим другой радиус-вектор. Вектор **B** на **рис. А.1, б**, начинается у библиотеки, а кончается у дома вашего друга. Этот радиус-вектор задает положение дома вашего друга относительно библиотеки, его длина равна 2,828 км, и направлен он под углом 45° относительно южного направления. Оказавшись в библиотеке, вы сможете по этому вектору найти дом своего друга.

А как вам попасть из своего дома в дом друга? Чтобы проложить маршрут, необходимо сложить два вектора — сначала вы пройдете по вектору **A** от вашего дома до библиотеки, затем по вектору **B** от библиотеки до дома друга. Но вы могли бы сразу отправиться из дома к другу по новому вектору **C**, показанному на **рис. А.1, в**. Вектор, который проходит от вашего дома к дому вашего друга, является

**Рис. А.1.** Четыре плана города — улицы пролегают с севера на юг и с востока на запад на расстоянии 1 км друг от друга. (а) Чтобы попасть из своего дома в библиотеку, вы должны пройти 3,162 км в направлении 18,43° к востоку от северного направления — то есть по вектору **A**. (б) Чтобы попасть из библиотеки к дому вашего друга, надо пройти 2,828 км в направлении 45° к югу от восточного направления — то есть по вектору **B**. (с) Из своего дома в дом друга вы можете прийти, либо сначала преодолев путь до библиотеки вдоль вектора **A**, а затем оттуда до дома друга вдоль вектора **B**, либо сразу отправившись по вектору **C**, который является суммой векторов **A** и **B**. (г) Вы окажетесь в гостях и в том случае, если сначала пойдете по вектору **B**, а затем по вектору **A**. Суммой двух векторов по-прежнему будет вектор **C**. Но так вы не попадете в библиотеку до визита к другу.



суммой векторов  $A$  и  $B$ , его модуль составляет 3,162 км, а направлен он под углом  $18,43^\circ$  к северу от восточного направления. Обозначив вектора жирными буквами  $A$ ,  $B$  и  $C$ , мы можем записать равенство  $A + B = C$ , и это означает, что вектор  $C$  складывается из векторов  $A$  и  $B$ .

Другой оригинальный способ попасть от вас к другу показан на **рис. А.1, г**: вы сначала идете вдоль вектора  $B$ , а затем — вдоль вектора  $A$ . Вы достигнете цели — дома друга, но библиотеку обойдете стороной. Первый этап маршрута заведет вас в другой район, а второй завершится в доме друга. Вектора  $B$  и  $A$  в сумме также дают вектор  $C$ , или  $B + A = C$ . То есть, складывая вектора в любом порядке, вы будете получать один и тот же результат.

Хотя сумму двух векторов можно найти, вычертив на листе бумаги стрелочки, надо еще подумать, что же такое их сумма на самом деле. Просто сложив два модуля, вы не получите модуль суммарного вектора, а сумма направлений вообще не имеет смысла. Для того чтобы сложить два вектора, удобно представить их в другом виде — разложить их на составляющие по двум или трем перпендикулярным по отношению друг к другу осям. Для нашей прогулки по городу достаточно двух осей. Если бы имела значение еще и высота, пришлось бы использовать все три перпендикулярные оси.

В качестве двух перпендикулярных осей, необходимых нам для описания городского путешествия, выберем восточное и северное направления. Мы можем разложить вектор  $A$  на восточную и северную составляющие. Восточная составляющая равна 1 км, а северная — 3 км, то есть вектор  $A$ , радиус-вектор библиотеки относительно вашего дома, получится, если пройти 1 км на восток и 3 км на север.

В новом виде, как совокупность двух отрезков, вектор становится удобнее для расчетов, чем в обычном, как совокупность расстояния и направления. На прямом пути в библиотеку — 3,162 км под углом  $18,43^\circ$  восточнее северного направления — вам попадутся всевозможные строения и заборы. Выбрав другой маршрут — 1 км на восток и 3 км на запад, — вы сможете спокойно идти по тротуару.

Если принять координаты вашего дома за 0 км по восточной оси и 0 км по северной, радиус-вектор библиотеки задается составляющими 1 км по восточной оси и 3 км по северной. На **рис. А.1, а**, этим точкам соответствуют обозначения  $(0, 0)$  и  $(1, 3)$ . Первая цифра в скобках — это расстояние по восточной оси, измеренное в километрах, вторая — расстояние по северной оси, также измеренное в километрах.

Чтобы попасть из библиотеки в дом вашего друга, вы должны пройти 2 км на восток и 2 км на юг. Это новое представление вектора  $B$ . Поскольку южный конец имеет отрицательную координату по северной оси, радиус-вектор дома вашего друга относительно библиотеки имеет составляющие 2 км по восточной оси и  $-2$  км по северной. На **рис. А.1, б**, библиотеке отвечает точка  $(0, 0)$ , а дому вашего друга — точка  $(2, -2)$ .

Теперь сложить векторы  $A$  и  $B$  уже проще. Чтобы добраться от своего дома к другу, по дороге посетив библиотеку, вы должны пройти на восток 1 км и еще 2 км, чтобы всего получилось 3 км, а на север — 3 км и еще  $-2$  км, что в итоге даст 1 км. Таким образом, радиус-вектор дома вашего друга относительно вашего собственного дома, вектор  $C$ , имеет составляющие 3 км по восточной оси и 1 км по северной. На **рис. А.1, в** ваш дом расположен в точке  $(0, 0)$ , а дом вашего друга — в точке  $(3, 1)$ .

Вы могли бы точно так же попасть из дому к другу, если бы сначала пошли по вектору  $B$ , а потом — по вектору  $A$ , как показано на **рис. А.1, г**. Пришлось бы побродить по незнакомым улицам, но вы все равно достигли бы цели. Сначала вы пошли бы на восток 2 км и еще 1 км, затем на север  $-2$  км и еще 3 км. В конце концов вы окажетесь на 3 км восточнее и на 1 км севернее своего дома. То есть сложение векторов  $B$  и  $A$  тоже даст вектор  $C$ .

Как видите, в нашем трехмерном пространстве векторы здорово помогают описывать физические величины. Если вам доведется иметь дело с векторами, не забудьте, что его направление не менее важно, чем модуль, и что при сложении двух векторов надо учитывать их направления.



## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

# ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ, ПЕРЕВОД ЕДИНИЦ

---

**Е**сли вы вернулись из похода и хотите рассказать о нем друзьям, вам не обойтись без упоминания самых разных физических величин. Расстояние, вес, температура и время в повседневной жизни важны не меньше, чем в лаборатории. Чтобы объяснить, сколько вы прошли пешком, сколько весил ваш рюкзак, как было холодно и как долго продолжалось путешествие, нужно будет привести эти величины к стандартным единицам — иначе друзья просто не смогут оценить ваши подвиги.

Большинство физических величин не выражаются одними числами, такими как, скажем, 7 или 2,9. Вместо этого существуют различные единицы измерения — например, длина или время измеряются в таких общепринятых единицах, как метры или секунды. Когда вы говорите, что «высота этой двери 3 метра», вы сравниваете высоту двери с мерой, общепринятым эталоном единицы длины. При помощи такого сравнения большинство людей понимают, насколько высока дверь, даже если они ее не видели.

Но не все знают, что такое метр; многие предпочитают измерять длину в других стандартных единицах — футах. Им будет понятней, если вы скажете, что высота двери — 9,8 фута. Эти величины, 3 м и 9,8 фута, выражают одинаковую длину.

Чтобы определить высоту двери в футах, не нужно измерять ее заново: мы можем перевести метры в футы. Для этого нужно знать, как выразить одно и то же значение длины в тех и других единицах. Для этого подойдет любая длина. Например, согласно таблице Б.1 1 фут имеет такую же длину, как 0,30480 метра. Зная это, мы можем написать:

$$\frac{1 \text{ фут}}{0,30480 \text{ метра}} = 1.$$

Мы можем умножить высоту двери, 3 метра, на это значение единицы и получить высоту двери в футах:

$$3,0 \text{ метра} \times \frac{1 \text{ фут}}{0,30480 \text{ метра}} = 9,8425 \text{ фута}.$$

Обратите внимание, что исходные размерности (единицы измерения), метры, сокращаются и заменяются новыми единицами, футами. Так как мы знали высоту двери с точностью до одного десятичного знака, то не имеем права использовать в результате более высокую точность\*. Таким образом, мы должны округлить результат до значения 9,8 фута.

Вы можете пересчитать значение почти любой физической величины из одних единиц в другие, умножив это значение на соответствующее значение единицы. Это значение единицы равно частному от деления новой размерности на исход-

\* Это не совсем так. Мы не можем увеличить точность измерения высоты, но число десятичных знаков не всегда определяет ее. Эта же дверь имеет высоту 0,003 км (3 десятичных знака). В данном случае метр и фут не настолько отличаются друг от друга, чтобы имело смысл менять число значащих цифр после запятой.

ную, причем количество единиц исходной размерности в числителе должно быть эквивалентно их количеству в знаменателе. Пары эквивалентных значений приведены в таблице Б.1. После перемножения исходные размерности сокращаются, и вы получаете значение данной физической величины уже в новых единицах.

И последнее замечание о единицах измерения. Производя расчеты с участием физических величин, убедитесь, что вы все время используете одни и те же единицы. Это крайне важно. Некоторые размерности могут сократиться, но какие-то, вероятнее всего, останутся, и это должны быть именно те единицы, в которых вы хотите получить результат. Если вы рассчитываете длину, результат должен быть выражен в метрах, футах или другой известной единице длины. Если результат получился в секундах или килограммах, значит, вы ошиблись.

**Таблица Б.1.**  
**Перевод единиц измерения \***

\* В данной таблице перечислены пары эквивалентных единиц измерения одних и тех же величин, одна единица в системе СИ, другая — в другой системе. Каждую пару можно использовать для перевода значения величины из одной системы в другую. Пары сгруппированы по физическим величинам и приведены с точностью до 5 значащих цифр.

**1. Время (единица СИ: 1 секунда, или 1 с):**

1 сутки	= 86 400 с
1 фемтосекунда (1 фс)	= $10^{-15}$ с
1 час	= 3600 с
1 микросекунда (1 мкс)	= $10^{-6}$ с
1 миллисекунда (1 мс)	= 0,001 с
1 минута	= 60 с
1 наносекунда (1 нс)	= $10^{-9}$ с
1 пикосекунда (1 пс)	= $10^{-12}$ с

**2. Давление (единица СИ: 1 паскаль, или 1 Па):**

1 атмосфера	= 101 325 Па
1 миллиметр ртутного столба (1 мм рт. ст.)	= 133,32 Па
1 фунт/дюйм <sup>2</sup>	= 6,8948 Па

**3. Длина (единица СИ: 1 метр, или 1 м):**

1 ангстрем (1 Å)	= $10^{-10}$ м
1 сантиметр (1 см)	= 0,01 м
1 ферми (1 фм)	= $10^{-15}$ м
1 фут	= 0,30480 м
1 дюйм	= 0,02540 м
1 километр (1 км)	= 1000 м
1 световой год	= $9,4606 \times 10^{15}$ м
1 микрометр (1 мкм)	= $10^{-6}$ м
1 мил (одна тысячная дюйма)	= $2,5400 \times 10^{-5}$ м
1 миля	= 1609,3 м
1 миллиметр (1 мм)	= 0,001 м
1 нанометр (1 нм)	= $10^{-9}$ м
1 пикометр (1 пм)	= $10^{-12}$ м

**4. Крутящий момент (момент силы) (единица СИ: 1 ньютон-метр, или 1 Н·м):**

1 дюйм-фунт	= 0,11298 Н·м
1 фут-фунт	= 1,3558 Н·м

**5. Масса (единица СИ: 1 килограмм, или 1 кг)**

1 грамм (1 г)	= 0,001 кг
1 метрическая тонна	= 1000 кг
1 фунт (массы)	= 0,45359 кг
1 слаг	= 14,594 кг

**6. Мощность (единица СИ: 1 ватт, или 1 Вт):**

1 БТЕ/час	= 0,29307 Вт
1 лошадиная сила (1 л. с.)	= 745,70 Вт

**7. Объем (единица СИ: 1 кубический метр, или 1 м<sup>3</sup>):**

1 стакан	= 2,3659 × 10 <sup>-4</sup> м <sup>3</sup>
1 жидкая унция	= 2,9574 × 10 <sup>-5</sup> м <sup>3</sup>
1 фут <sup>3</sup>	= 0,028317 м <sup>3</sup>
1 галлон	= 0,0037854 м <sup>3</sup>
1 литр (1 л)	= 0,001 м <sup>3</sup>
1 миллилитр (1 мл)	= 10 <sup>-6</sup> м <sup>3</sup>
1 кварта	= 0,00094635 м <sup>3</sup>

**8. Плотность (единица СИ: 1 килограмм на кубический метр, или 1 кг/м<sup>3</sup>):**

1 фунт/фут <sup>3</sup>	= 16,018 кг/м <sup>3</sup>
-------------------------	----------------------------

**9. Площадь (единица СИ: 1 квадратный метр, или 1 м<sup>2</sup>):**

1 фут <sup>2</sup>	= 0,092903 м <sup>2</sup>
1 дюйм <sup>2</sup>	= 6,4516 × 10 <sup>-4</sup> м <sup>2</sup>

**10. Сила (единица СИ: 1 ньютон, или 1 Н):**

1 фунт	= 4,4482 Н
--------	------------

**11. Скорость (единица СИ: 1 метр в секунду, или 1 м/с):**

1 фут в секунду (1 фут/сек)	= 0,30480 м/с
1 километр в час (1 км/ч)	= 0,27778 м/с
1 узел	= 0,51444 м/с
1 миля в час (1 миля/ч)	= 0,44704 м/с
1 миля в час (1 миля/ч)	= 1,6093 км/ч

**12. Температура (единицы СИ: градус Цельсия, или °С; Кельвин, или К)\*:**

Температура, °С	= 5/9 × (Температура, °F – 32)
Температура, °С	= Температура, К – 273,15
Температура, К	= Температура, °С + 273,15

\* Поскольку температуры, выраженные в трех распространенных единицах, °С, К и °F, не кратны друг другу, используются специальные формулы преобразования:

**13. Угол (единица СИ: 1 радиан):**

1 градус (1°)	= 0,017453 радиана
---------------	--------------------

**14. Ускорение (единица СИ: 1 метр в секунду в квадрате, или 1 м/с<sup>2</sup>):**

1 фут в секунду <sup>2</sup> (1 фут/сек <sup>2</sup> )	= 0,30480 м/с <sup>2</sup>
--	----------------------------

**15. Энергия (единица СИ: 1 джоуль, или 1 Дж):**

1 БТЕ	= 1054,7 Дж
1 калория (термохимическая)	= 4,1840 Дж
1 электронвольт (1 эВ)	= 1,6022 × 10 <sup>-19</sup> Дж
1 фут-фунт	= 1,3558 Дж
1 ккал (большая, или пищевая)	= 4186,8 Дж
1 киловатт-час	= 1 кВт × ч = 3 600 000 Дж



# ГЛОССАРИЙ

## **абсолютная шкала температур (шкала Кельвина)**

Шкала измерения температур, в которой абсолютному нулю соответствует 0 К.

**абсолютный нуль** Температура, при которой тело или система тел полностью теряет тепловую энергию. Поскольку невозможно найти полную тепловую энергию тела и лишить его этой энергии, абсолютный нуль недостижим — к нему можно лишь приблизиться.

**акселерометр** Устройство для измерения ускорения по положению груза, подвешенного в состоянии устойчивого равновесия на пружине или закрепленного на упругой опоре. Когда система приобретает ускорение, груз смещается из положения равновесия, поскольку под действием результирующей силы он приобретает такое же ускорение.

**активная среда лазера** Среда, которая состоит из возбужденных атомов или других квантовых систем, способная усиливать проходящий свет за счет вынужденного излучения.

**альфа-распад** Радиоактивный распад, при котором в результате туннелирования тяжелые ядра с большим количеством протонов испускают ядра гелия (два протона и два нейтрона).

**аморфное вещество** Вещество, которое не является кристаллом и не имеет дальнего порядка (упорядоченной структуры, сохраняющейся на бесконечно больших расстояниях).

**ампер (А)** Единица измерения силы тока в СИ (то же, что кулон в секунду). Один ампер — это сила тока, который возникает в результате прохождения  $6,25 \times 10^{18}$  заряженных частиц за секунду; в бытовой электролампочке мощностью 100 Вт протекает ток, примерно равный 1 А\*.

**амплитуда** Максимальное отклонение колеблющегося тела от состояния равновесия.

**амплитудная модуляция** Способ воспроизведения звука или других сигналов путем изменения амплитуды (силы) волны.

\*Это верно для США, где напряжение сети составляет 110–120 В. В России, где напряжение 220 В, сила тока в лампочке мощностью 100 Вт будет равна 0,5 А.

**аналоговое представление** Отображение параметров в виде непрерывного ряда значений физических величин — например, напряжения, заряда или давления.

**английская система единиц** Набор устаревших единиц измерения, которые применялись в английских колониях и по сей день применяются в США. Например, футы, унции и мили в час.

**антивещество** Вещество, противоположное по некоторым свойствам — таким как электрический заряд — обычному веществу.

**антиферромагнетик** Вещество, которое состоит из атомов с направленными в противоположные стороны магнитными моментами, в результате чего магнитное поле исчезает.

**апертура** Диаметр действующего отверстия объектива или диафрагмы.

**атмосферное давление** Давление воздуха в атмосфере Земли. Достигает максимума в 100 000 Па на уровне моря и уменьшается по мере набора высоты.

**атом** Мельчайшая частица химического элемента, которая сохраняет его химические свойства.

**атомное ядро** Положительно заряженная часть атома, в которой содержится основная доля атомной массы и вокруг которой расположены электроны.

**атомный номер (атомное число)** Количество протонов в атомном ядре, равное количеству электронов в нейтральном атоме.

**аэродинамика** Наука о динамических (то есть тех, что возникают при движении) взаимодействиях воздуха и физического тела.

**аэродинамическая поверхность (профиль)** Поверхность, сконструированная с учетом законов аэродинамики так, чтобы в потоке воздуха рядом с ней возникали определенные подъемная сила и сила лобового сопротивления.

**байт** 8 двоичных битов, может принимать значения чисел от 0 до 255. Байты используются для представления букв и прочих символов, причем каждому символу присваивается определенное число согласно принятым правилам.

**бегущая волна** Волна, которая распространяется непрерывно и равномерно в определенном направлении.

**бета-распад** Радиоактивный распад под воздействием слабых сил, при котором нейтрон крупного ядра испускает электрон, протон и антинейтрино. Протон остается в ядре, а электрон и антинейтрино уходят.

**бинарное (двоичное)** представление Цифровое представление чисел степенями двойки. Число  $b$  в бинарной системе представляется как  $110, 1 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 0 \times 2^0$ .

**бит** Один двоичный разряд, 0 или 1.

**боковая полоса** Волны, частоты которых больше или меньше частоты несущей волны; формируются при модуляции несущей волны.

**валентная зона** Группа квантовых уровней диэлектрика, расположенная ниже уровня Ферми.

**валентные электроны** Внешние электроны атома. Именно эти электроны определяют химические свойства атома в целом.

**валентный уровень** Энергетический уровень диэлектрика ниже уровня Ферми; в нормальном состоянии занят электронами.

**ватт (Вт)** Единица измерения мощности в СИ, равная переносу энергии 1 Дж в секунду. Один ватт — это мощность лампочки обычного фонарика.

**векторная величина** Величина, характеризующая некоторые свойства физической системы и имеющая численное значение (модуль) и направление в пространстве.

**величина (модуль)** Количественная характеристика некоторых физических величин.

**вертикальная поляризация** Вертикальное направление (вверх или вниз) электрического поля в электромагнитной волне. Магнитное поле при этом всегда направлено по горизонтали.

**вес тела (у поверхности Земли)** Направленная вниз сила, которая действует на тело в результате гравитационного взаимодействия с Землей. Равен произведению массы тела на ускорение свободного падения. Всегда направлен к центру Земли.

**видимый свет** Свет с длиной волн от 400 (фиолетовая область) до 750 (красная область) нанометров. Глаз может различать свет только в этой небольшой области электромагнитного спектра.

**вихрь** Область закручивания потока, где он движется по кругу над центральной впадиной.

**внутренняя кинетическая энергия** Доля кинетической энергии тела, обусловленная только относительным движением его частиц, но не прямолинейным или вращательным движением всего тела.

**внутренняя потенциальная энергия** Доля потенциальной энергии тела, обусловленная только силами взаимодействия между частицами, но не взаимодействием самого тела с окружающей средой.

**внутренняя энергия** Сумма тепловой энергии тела и всей добавочной потенциальной энергии, накопленной во всем теле.

**вогнутое зеркало** Зеркало, вогнутое внутрь подобно внутренней поверхности чаши.

**водородная связь** Умеренно прочная химическая связь, в которой ядро водорода, не окруженное со всех сторон другими атомами, притягивается к электронам ближайшего атома кислорода.

**возбужденное состояние** Конфигурация системы с избыточной энергией; комбинация волновых функций электронов и других частиц (то есть распределение электронов и других частиц по орбиталам, или энергетическим уровням) такова, что энергия системы превышает минимально возможную.

**возвращающая сила** Сила, действие которой направлено на возвращение системы в состояние равновесия. Возвращающая сила направлена в сторону того положения системы, в котором она принимает равновесную форму.

**вольт (В)** Единица измерения электрического потенциала в СИ (то же, что джоуль, деленный на кулон). Потенциал на положительном контакте обычной батарейки примерно на 1,5 В выше, чем на отрицательном.

**вольт на метр (В/м)** Единица измерения напряженности электрического поля в СИ (то же, что ньютон, деленный на кулон).

**вращательное движение** Движение, при котором тело поворачивается вокруг оси. Ориентация тела, которое участвует только во вращательном движении, может меняться, но его координаты сохраняются.

**вращательный импульс** Механическое средство передачи момента импульса. Одно тело сообщает другому момент импульса, если последнее в течение какого-то времени подвергается воздействию момента силы. В свою очередь, второе тело сообщает первому такой же по величине вращательный импульс (момент импульса), направленный в противоположную сторону.

**вторая космическая скорость** Скорость, которую должен развить летательный аппарат, чтобы выйти на параболическую орбиту и покинуть область притяжения небесного тела.

**второй закон Кеплера** Отрезок, соединяющий Солнце и планету, заметает равные площади за равные промежутки времени.

**второй закон Ньютона для вращательного движения** Угловое ускорение тела равно действующему на тело моменту силы, деленному на момент инерции. Можно алгебраически преобразовать это уравнение и показать, что момент силы, действующий на тело, равен произведению его момента инерции на угловое ускорение (уравнение 2.1.2). К раскачивающимся телам этот закон неприменим.

**второй закон Ньютона для поступательного движения** Ускорение тела равно приложенной к нему силе, деленной на его массу. Можно алгебраически преобразовать это уравнение и показать, что действующая на тело сила равна произведению его массы на ускорение (уравнение 1.1.2).

**второй закон термодинамики** Энтропия термически изолированной системы не может уменьшаться. Этот закон показывает, что устроить беспорядок очень легко, а навести порядок трудно.

**вулканизация** Процесс сшивания отдельных цепей термопласта с образованием реактопласта.

**выигрыш в силе** Процесс перераспределения сил и расстояний с помощью какого-нибудь механического устройства, при котором производится определенная механическая работа.

**вынужденное деление** Деление, которое происходит в результате столкновения — обычно с нейтроном.

**вынужденное излучение** Испускание света, которое происходит, когда возбужденный атом или атомоподобная система высвобождает накопленную энергию при радиационном переходе, дублируя проходящий через эту систему фотон.

**выпуклое зеркало** Зеркало, выгнутое посередине наружу подобно внешней поверхности чаши.

**высокоэластичное (каучукоподобное) течение** Режим течения аморфного полимера, при котором молекулы совершают рептакционные движения, достаточные для медленного перемещения друг за другом. В таком состоянии полимер упругий и течет очень медленно.

**высота звука** Частота звука.

**выталкивающая (архимедова) сила** Направленная вверх сила, с которой жидкость действует на погруженное в нее тело. Вызывается давлением жидкости. Это давление достигает максимального значения под телом, поэтому сила, действующая на тело снизу вверх, больше той, что действует на верхнюю поверхность тела и толкает его вниз.

**вязкое (внутреннее) трение** Сила, возникающая в потоке и противодействующая относительному движению. Слои жидкости, смещаясь относительно друг друга, действуют друг на друга с силой вязкого трения.

**вязкое сопротивление** Сопротивление, обусловленное внутренним трением на поверхности погруженного в поток движущегося тела.

**вязкость** Мера сопротивления потока относительному движению внутри потока.

**вязкостекучий режим потока** Режим, при котором цепи аморфного полимера извиваются достаточно быстро для того, чтобы сохранялось течение. Полимер становится вязкой жидкостью.

**газ и газообразное состояние** Состояние, при котором вещество представляет собой совокупность не связанных между собой мелких частиц (атомов и молекул), движущихся независимо друг от друга. Газ принимает форму и объем предоставленной ему емкости.

**газовый разряд** Распространение электрического тока в газовой среде.

**гамма-лучи** Электромагнитное излучение фотонов с очень высокой энергией, часто испускаемое при радиоактивном распаде.

**гармонический осциллятор** Осциллятор (колебательная система), в которой возвращающая сила пропорциональна смещению тела из положения равновесия. Период колебаний гармонического осциллятора не зависит от амплитуды.

**гармоническое колебание** Правильное, повторяющееся движение гармонического осциллятора. Период гармонического колебания не зависит от амплитуды колебания.

**гасящая интерференция** Интерференция, при которой в одной и той же области пространства одновременно возникают две и более волны с несопадающими фазами, в результате чего колебания слабеют.

**генри (Гн)** Единица измерения индуктивности в Международной системе единиц. В катушке с индуктивностью 1 Гн при перепаде напряжения 1 В сила тока изменяется на 1 А за секунду.

**герц** (период в секунду) Единица измерения частоты колебаний в СИ.

**гидравлический удар** Удар движущейся массы воды при ее неожиданной остановке.

**гироскоп** Вращающийся диск, который сохраняет ориентацию в пространстве до тех пор, пока на него не действуют внешние моменты сил.

**главная колебательная мода** Самое медленное и часто самое широкое колебание, которое может быть возбуждено в протяженной системе.

**горизонтальная поляризация** Электромагнитная волна, электрическое поле которой всегда направлено влево или вправо (по горизонтали). Магнитное поле при этом всегда направлено по вертикали.

**гравитационная масса** Масса, связанная с гравитационным притяжением тел.

**гравитационная постоянная** Фундаментальная физическая постоянная, которая определяет силу притяжения двух тел друг к другу. Равна  $6,6720 \times 10^{-11} \text{ Н}\cdot\text{м}^2/\text{кг}^2$ .

**гравитация** Гравитационное притяжение массы Земли, Луны или планеты, действие которого испытывают тела, находящиеся у поверхности Земли, Луны, планеты или достаточно близко к ней. Все тела действуют на другие тела с силой притяжения.

**градиент давления** Распределение давления, непрерывно меняющегося в зависимости от места.

**градиент потенциала электрического поля** Постепенное уменьшение электрического потенциала в данной области пространства. Градиент потенциала — это напряженность электрического поля.

**давление** Усредненная величина силы, с которой жидкость или газ действует на определенный участок поверхности. Давление определяют как величину силы, деленную на площадь, на которую оказывает действие эта сила. Единица измерения давления в СИ — паскаль.

**дальний порядок** Единообразная пространственная структура, которая сохраняется в твердом веществе на протяжении многих нанометров.

**действительное изображение** Картина, отображенная в определенном месте и точно повторяющая картину отражения света от поверхности оригинала. Действительное изображение формируется за линзой, которая его создает, и может быть спроецировано на плоскость.

**доление ядра** Расщепление тяжелого ядра на более мелкие фрагменты. В процессе деления положительно заряженные фрагменты отталкиваются друг от друга с высвобождением энергии.

**десублимация** Фазовый переход, превращение газа в твердое вещество.

**десятичное представление** Цифровое представление чисел показателями степеней 10. Число 124 представляется как  $124$ , где 1 соответствует сотням ( $10^2$ ), 2 — десяткам ( $10^1$ ) и 4 — единицам ( $10^0$ ).

**деформационное (механическое) упрочнение** Повышение прочности поликристаллического материала при обширных манипуляциях, уменьшающих размер зерна.

**деформация сдвига** Угол изгиба материала под воздействием напряжения сдвига.

**джоуль в секунду (Дж/с)** Единица измерения мощности в СИ (то же, что ватт).

**джоуль, деленный на килограмм-градус (Дж/кг·К)** Единица измерения удельной теплоемкости в СИ.

**джоуль (Дж)** Единица измерения энергии и работы в СИ (то же, что ньютон-метр). Для того чтобы поднять литр воды на 10 см у поверхности Земли, надо совершить работу, примерно равную 1 Дж.

**диафрагменное число (f-число)** Отношение фокусного расстояния объектива к диаметру диафрагмы.

**динамическая устойчивость** Устойчивость тела при движении.

**динамические отклонения** Изменения физических величин, например давления, вызванные движением.

**диод** Полупроводниковый прибор, в котором заряд может перемещаться только в одном направлении. Обычно в диоде осуществляется контакт кремния с электронной проводимостью (n-типа) и кремния с дырочной проводимостью (p-типа).

**дислокация** Неполная плоскость атомов, дефект кристаллической структуры.

**дисперсия света** Зависимость скорости света в веществе от частоты излучения.

**дифракция** Волновое явление, которое снижает способность лучей света фокусироваться и изменяет пути их распространения после прохождения через диафрагму.

**диэлектрик** Твердое вещество, в котором уровень Ферми поощаает в запрещенную зону.

**длина волны** Структурный параметр волны, расстояние между соседними гребнями или ложбинами волны.

**доменная стенка** Поверхность раздела между магнитными доменами с различными направлениями намагниченности.

**единицы измерения** Общепринятые значения физических величин, задающие систему, в которой эти величины должны измеряться.

**емкость** Величина заряда на одной обкладке конденсатора, деленная на разницу потенциалов между обкладками. Единица измерения емкости в СИ — фарад.

**жесткий (о материале)** Материал, который обладает большим коэффициентом упругости и на незначительные деформации реагирует с большой возвращающей силой.

**жесткость** Величина, которая показывает, как быстро увеличивается возвращающая сила по мере деформации системы, оказавшейся под действием этой силы.

**жидкие кристаллы** Жидкости, молекулы которых по форме напоминают палочки или диски и расположены в определенном порядке.

**жидкости и газы** Вещества, имеющие массу, но не имеющие определенной формы. Способны растекаться по предоставленному им объему.

**жидкость** Состояние вещества, при котором частицы (атомы или молекулы) сталкиваются друг с другом, хотя способны свободно перемещаться относительно друг друга. Жидкость имеет фиксированный объем, но принимает форму емкости, в которой она находится.

**закалывать (металл)** Подвергать материал нагреву при умеренной температуре, чтобы снять остаточное напряжение.

**закалывать (стекло)** Делать стекло мягким при высокой температуре и быстро охлаждать его поверхность с тем, чтобы подвергнуть эту поверхность напряжению сжатия.

**закалка** Быстрое охлаждение нагретого до высокой температуры вещества, с тем чтобы не дать ему времени постепенно перейти в состояние, нормальное для низкой температуры.

**закон Архимеда** Установленный опытным путем закон гласит, что на тело, частично или полностью погруженное в жидкость, действует выталкивающая сила, равная весу замещенной телом жидкости.

**закон всемирного тяготения** Все тела во Вселенной притягиваются друг к другу с силой, равной произведению гравитационной постоянной на массы обоих тел, деленному на квадрат расстояния между ними.

**закон Гука** Основной закон, описывающий поведение пружин и упругих материалов. Согласно закону Гука в пружине развивается возвращающая сила, пропорциональная растяжению пружины относительно ее длины в положении равновесия.

**закон Кулона** Величина силы электростатического взаимодействия двух тел равна постоянной Кулона, умноженной на произведение зарядов, деленное на квадрат расстояния между ними. Если заряды одинаковы, возникает сила отталкивания. На противоположные заряды действуют притягивающие силы.

**закон Ома** Напряжение, возникающее в обычном проводнике, пропорционально протекающему по нему току и его сопротивлению.

**закон Паскаля** Изменение давления передается одинаково по всем направлениям в объеме несжимаемой жидкости вплоть до стенок содержащей ее емкости.

**закон Пуазейля** Объем жидкости, протекающей по трубе за секунду, равен произведению коэффициента  $\pi/128$  на разницу давлений в трубе и на ее диаметр в четвертой степени, деленному на произведение длины трубы на вязкость жидкости.



- закон Стефана — Больцмана** Уравнение, связывающее излученную поверхностью энергию с излучательной способностью, температурой и площадью поверхности.
- закон (уравнение) Бернулли** Уравнение, связывающее полную энергию несжимаемой жидкости в равномерном устоявшемся потоке и сумму ее потенциальной энергии, обусловленной силами давления, кинетической энергии и гравитационной потенциальной энергии.
- законы термодинамики** Четыре закона, описывающие передачу тепла от одного тела или вещества другому.
- замедлитель нейтронов** Вещество, в котором происходят столкновения быстрых нейтронов с потерей энергии, но без их присоединения к ядрам. Нейтроны покидают среду замедлителя (демпфера), имея только тепловую энергию.
- замерзание** Фазовый переход, при котором жидкость превращается в твердое вещество.
- замкнутый контур** Замкнутый электрический контур, по которому ток может протекать постоянно.
- запрещенная зона** Область, в которой твердое вещество не имеет разрешенных энергетических уровней.
- зародыш кристалла (затравка)** Первичный кристалл, на котором может кристаллизоваться затвердевающая жидкость.
- заряды** Объекты, в особенности малые частицы, которые несут электрический заряд.
- заряженные тела** Тела, особенно малые частицы, которые несут электрический заряд.
- звук** В воздухе звук представляет собой волны плотности, картину сжатий и разрежений, которые распространяются от источника к периферии со скоростью звука.
- зона проводимости** Совокупность квантовых уровней диэлектрика выше уровня Ферми.
- излучательный (радиационный) переход** Переход атома или подобной атому системы из одного состояния в другое за счет эмиссии или поглощения электромагнитной волны.
- изолятор** Вещество, которое препятствует коллективному перемещению электрического заряда.
- изотопы** Химически идентичные атомы, ядра которых отличаются лишь количеством нейтронов.
- импеданс (полное сопротивление)** Мера сопротивления системы прохождению электрического тока или волны.
- импульс (векторная величина)** Сохраняющаяся векторная величина, мера движения тела. Произведение массы тела на его скорость. Единица измерения импульса в СИ — килограмм-метр в секунду.
- импульс (удар)** Механическое средство передачи импульса силы. Тело сообщает импульс другому телу, если воздействует на него с определенной силой в течение определенного промежутка времени. В свою очередь, второе тело сообщает первому такой же по величине, но противоположно направленный импульс силы.
- инверсия заселенности** Неравновесное заселение квантовых уровней, при котором на уровнях с высокой энергией оказывается больше электронов, чем на нижних.
- индуктивное сопротивление** Сила сопротивления, вызванная изменением направления набегающего на крыло воздушного потока, создающего подъемную силу.
- индуктивность** Напряжение в катушке индуктивности, деленное на скорость изменения тока, протекающего в катушке. Единица измерения индуктивности в СИ — генри.
- инертный газ** Газ, атомы которого не проявляют химической активности и редко образуют прочные связи с другими атомами и молекулами. В группу инертных газов входят гелий, неон, аргон, криптон и ксенон.
- инерциальная система отсчета** Система отсчета, которая не движется с ускорением, то есть находится в покое или движется с постоянной скоростью. Все, что происходит в инерциальной системе отсчета, точно описывается законами движения.
- инерционная масса** Масса тела, связанная с его инерцией, сопротивлением ускорению.
- инерционный** Движущийся только по инерции, то есть без ускорения.
- инерция вращения** Свойство тела в отсутствие внешнего момента силы сохранять состояние покоя или вращаться с постоянной угловой скоростью вокруг одной и той же оси.
- инерция** Свойство тела оставаться в покое или двигаться равномерно и прямолинейно, если на него не действуют внешние силы.
- интерференционная картина** Рисунок изменений интенсивности во времени и пространстве, который возникает при наложении двух и более волн с усиливающей или гасящей интерференцией.
- интерференция** Волновое явление, при котором волны, проходящие через одну точку пространства в разных направлениях, усиливают или гасят друг друга.
- инфракрасное излучение** Невидимое световое излучение с длинами волн больше 750 нм.
- ион** Атом или молекула, которые несут суммарный электрический заряд.
- ионная связь** Химическая связь, в которой ионы соединяются благодаря своим противоположным зарядам.
- испарение** Фазовый переход, при котором жидкость превращается в пар.
- кажущееся ускорение** При движении с ускорением человеку кажется, что он обладает весом, направленным противоположно ускорению. Интенсивность этого ощущения пропорциональна величине ускорения.
- кажущийся вес** Результат сложения веса человека и перегрузки. Все три величины являются векторными, поэтому кажущийся вес может быть значительно выше, если направления веса и ускорения совпадают, и значительно ниже, если они противоположны.
- калибрование** Сравнение показаний прибора со стандартными единицами измерения.
- каналирование излучения** Явление затрудненного прохождения световой волны с определенной длиной в среде, когда происходит активное поглощение и испускание излучения. Свет передается от одного атома или системы атомов к другому атому или системе и таким образом понемногу продвигается вперед.

- катализатор** Химическое вещество, на поверхности которого за счет снижения энергии активации, необходимой для запуска реакции, создаются более благоприятные условия для ее протекания.
- катушка индуктивности** Электронный компонент, который накапливает магнитную энергию соленоида и противодействует изменению тока в нем.
- квант** Неделимая порция чего-либо, что может быть излучено, поглощено или наблюдаться как-то иначе, отражающая особые свойства этого явления или этой величины.
- квантованный** Существующий только в дискретном состоянии, или в виде квантов. Квантованные физические величины могут быть только целыми кратными элементарных квантов.
- килограмм, деленный на метр в кубе (кг/м<sup>3</sup>)** Единица измерения плотности в СИ. 1 кг/м<sup>3</sup> примерно равен плотности воздуха на высоте 2000 м над уровнем моря.
- килограмм (кг)** Единица измерения массы в СИ. Эталон килограмма — цилиндр из сплава платины с иридием, который хранится в Международном бюро мер и весов недалеко от Парижа. Массу, примерно равную 1 кг, имеет литр воды.
- килограмм- (метр в квадрате) в секунду (кг·м<sup>2</sup>/с)** Единица измерения момента импульса в СИ. 1 кг·м<sup>2</sup>/с примерно равен моменту импульса шара для боулинга массой 7,3 кг (16 фунтов), который катится по дорожке, совершая 34 оборота в секунду.
- килограмм- (метр в квадрате) (кг·м<sup>2</sup>)** Единица измерения момента инерции в СИ. 1 кг·м<sup>2</sup> примерно равен моменту инерции предплечья при повороте его вокруг локтя.
- килограмм-метр (кг·м/с)** Единица измерения импульса в СИ. 1 кг·м/с примерно равен импульсу бейсбольного мяча, который летит со скоростью 25 км/ч.
- килограмм-метр, деленный на секунду в квадрате (кг·м/с<sup>2</sup>)** Единица измерения силы в СИ (то же, что и ньютон)
- кинетическая энергия** Вид энергии, которая обусловлена прямолинейным и вращательным движением тела.
- кипение** Интенсивное испарение с образованием и ростом устойчивых пузырей пара в объеме жидкости.
- кислая среда** Среда, pH которой меньше 7.
- кислота** Химическое соединение, при растворении в воде которого увеличивается концентрация ионов водорода и понижается pH водной среды.
- коаксиальный кабель** Двухпроводниковый электрический кабель, в котором центральный изолированный провод окружен внешним цилиндрическим. Между двумя проводниками возникают электромагнитные волны, распространяющиеся вдоль кабеля со скоростью, близкой к скорости света.
- ковалентная связь** Сильная химическая связь атомов, возникающая при делокализации одной и более пар электронов в межатомном пространстве.
- когерентный свет** Свет, состоящий из одинаковых фотонов, которые вместе образуют электромагнитную волну.
- колебание** Самопроизвольные, повторяющиеся, ритмичные смещения относительно положения равновесия.
- колебания** Ритмичные, повторяющиеся движения или процессы, происходящие относительно положения (состояния) равновесия.
- колебательная мода высшего порядка** Более сложная по сравнению с главной колебательная мода, при которой разные части протяженной системы двигаются в противоположных направлениях.
- колебательный контур** простой электрический резонансный контур, в который входит конденсатор и катушка индуктивности. Энергия постоянно переходит от одного устройства к другому.
- конвекционный поток** Поток, закрученный в результате конвекции.
- конвекция** Передача тепла в результате движения потока. Обычно конвекция влечет за собой естественную циркуляцию потока, которая сопутствует разнице температур и плотностей.
- конденсация** Фазовый переход, при котором газ превращается в жидкость.
- конечная скорость** Скорость движения тела в жидкости или газе, при которой возникает сила сопротивления, достаточная для уравнивания других сил и удерживания его от падения.
- концентрация частиц** Количество частиц вещества, деленное на его объем. Для воды эта концентрация примерно равна  $3,35 \times 10^{28}$  молекул в кубическом метре. Для воздуха на уровне моря —  $2,687 \times 10^{25}$  молекул в кубическом метре.
- коронный разряд** Слабо светящийся разряд вокруг маленького тела с большим зарядом, которое возникает в газовой среде. При этом электрический заряд передается от тела молекулам газа.
- корпускулярно-волновой дуализм** Установлено, что все в природе имеет характер как частицы, так и волны. Когда объект испускается, поглощается или наблюдается еще каким-то образом, он проявляет в основном свойства частицы, а когда движется во времени и пространстве, ведет себя как волна.
- коэффициент возврата** Мера прыгучести мяча; определяется по отскоку мяча от жесткой, неподвижной поверхности. Отношение скорости отскока к скорости соударения.
- коэффициент излучения (степень черноты)** Способность поверхности испускать и поглощать тепловое излучение по отношению к такой же способности черного тела при той же температуре.
- коэффициент Кулона** Фундаментальная постоянная, которая определяет электростатические силы взаимодействия двух зарядов. Равен  $8,988 \times 10^9$  Н·м<sup>2</sup>/Кл<sup>2</sup>.
- коэффициент объемного расширения** Относительное изменение объема тела при нагревании его на 1°C.
- коэффициент преломления** Свойство, благодаря которому скорость света в веществе снижается по сравнению со скоростью света в вакууме. Коэффициент преломления равен скорости света в вакууме, деленной на скорость света в данном веществе.

**коэффициент упругости** Поскольку коэффициент упругости служит мерой жесткости упругого тела (пружины), он связывает деформацию тела и действующую на тело возвращающую силу. Чем выше коэффициент упругости, тем жестче пружина.

**кристаллическая решетка** Правильный геометрический рисунок, бесконечно повторяющийся во всех направлениях.

**кристаллическая структура** Структура, атомы в которой расположены в определенном порядке, повторяющемся на протяжении многих атомных расстояний во всех направлениях.

**кристаллическое зорно** Крошечный кристалл, частица поликристаллического вещества.

**кристалл** Упорядоченная структура, состоящая из атомов или молекул, в которой соблюдаются определенные позиционные и ориентационные закономерности. Частицы уложены в простой геометрический узор, повторяющийся во всех направлениях на любые расстояния.

**критическая масса** Порция способного к ядерному распаду вещества, в которой может поддерживаться цепная реакция деления ядра. Количество необходимого материала зависит от массы, формы и плотности образца.

**круговая поляризация** Поляризация световой волны, при которой электрическое и магнитное поля волны вращаются вокруг направления ее распространения.

**кулон (Кл)** Единица измерения электрического заряда в СИ. Один кулон примерно в миллион раз больше заряда, который возникает при трении подошв о ковровое покрытие — это особенно заметно зимой.

**лазер (явантовый генератор излучения)** Лазерный усилитель, снабженный зеркалами, который может генерировать интенсивный поток когерентного света путем усиления спонтанного излучения фотонов.

**лазерный усилитель** Устройство, усиливающее слабый входящий свет и выходящее более интенсивный. Исходящий свет представляет собой более яркую копию входящего.

**ламинарный поток** Плавное, предсказуемое течение потока, когда прилегающие друг к другу слои при движении всегда остаются прилегающими.

**легированный (о материале)** Модифицированный путем добавления химической примеси, которая меняет физические свойства материала.

**линейно поляризованная волна** Световая волна, электромагнитные колебания которой при распространении света в пространстве происходят в плоскости вперед и назад.

**линза** Прозрачное оптическое устройство, в котором используется явление преломления света для изменения его направления и формирования изображения.

**линии магнитной индукции** Абстрактные линии, направленные соответственно ориентации магнитного поля в данной точке и расположенные с плотностью, пропорциональной величине магнитной индукции. Линии магнитного поля всегда проходят от северного полюса к южному.

**линия тока** Траектория определенной части потока.

**ложбина (подошва) волны** Максимальная отрицательная амплитуда колебаний протяженной системы, в которой реализуется волна.

**люмен** Общеупотребительная единица измерения суммарного потока света, воспринимаемого глазом.

**люминесценция** Испускание света любым способом, кроме теплового излучения.

**люминофор** Твердое вещество, способное люминесцировать, то есть испускать свет, при поглощении энергии — света или в результате соударения с какими-нибудь частицами.

**магнитизация** Возникновение магнитной поляризации в веществе.

**магнитная индукция** Явление, в результате которого изменяющееся во времени магнитное поле порождает ток или оказывает на него влияние.

**магнитная поляризация** Распределение магнитных полюсов, в результате которого предмет имеет зоны северного и южного полюсов.

**магнитная постоянная** Константа, которая связывает два полюса и магнитостатические силы их взаимодействия. Равна  $4\pi \times 10^{-7}$  Н/А<sup>2</sup>.

**магнитное поле** Свойство, благодаря которому в каждой точке пространства возникают силы, воздействующие на магнитный полюс. Магнитное поле характеризуется направлением и величиной, пропорциональной силе, с которой оно действует на северный полюс магнитной стрелки в данной точке. Единица измерения индукции магнитного поля в СИ — тесла.

**магнитный домен** Зона постоянной ориентации вектора намагниченности в магнитном веществе.

**магнитомягкий материал** Материал, который намагничивается относительно легко, но, как только снимается действие магнитного поля, теряет свои магнитные свойства. Магнитомягкие материалы подходят для электромагнитов.

**магнитостатическая сила** Сила, действующая на магнитный полюс в присутствии других магнитных полюсов.

**магнитотвердый материал** Материал, который относительно трудно намагничивается и сохраняет магнитные свойства после того, как на него перестает действовать магнитное поле.

**максимум (вершина) волны** Положительное пиковое отклонение в протяженной системе, в которой распространяется волна.

**масса** Характеристика тела, мера его инерции, или сопротивления ускорению, обычно принимается за меру количества вещества, которое несет эту массу; благодаря массе тело имеет вес в гравитационном поле. Единица измерения массы в СИ — килограмм.

**металлическая связь** Образование химической связи в металлах. Электроны распределены между несколькими атомами, за счет чего атомы и связываются друг с другом.

**металл** Твердое вещество, в котором уровень Ферми попадает в зону электронных уровней.

**метр (м)** Единица измерения длины и расстояния в СИ. 1 м приравнивается к расстоянию, которое проходит свет в вакууме за  $1/299792458$  секунды. 1 метр — это примерно ширина большого шага.

**метр<sup>2</sup> (м<sup>2</sup>)** Единица измерения площади в СИ. 1 квадратный метр примерно вдвое больше площади развернутой газеты.

**метр<sup>3</sup> (м<sup>3</sup>)** Единица измерения объема в СИ. 1 кубический метр примерно равен объему шкафа-картотеки с четырьмя ящиками.

**метр в секунду (м/с)** Единица измерения скорости в СИ. 1 м/с — это приблизительно средняя скорость при ходьбе пешком.

**метр, деленный на секунду в квадрате (м/с<sup>2</sup>)** Единица измерения ускорения в СИ. 1 м/с<sup>2</sup> примерно отвечает ускорению лифта в начале его подъема.

**механическое колебание** Естественное, часто ритмичное движение протяженной системы относительно состояния равновесия или равновесной формы.

**микроволны** Электромагнитные волны, длины которых лежат в диапазоне от 1 м до 1 мм.

**мнимое изображение** Кажущаяся картина лучей, которая формируется в определенной области и воспроизводит картину лучей, характерную для поверхности исходного объекта. Мнимое изображение формируется перед линзой и не может быть спроецировано на плоскость.

**мода** Основной рисунок искажения или колебания.

**модулированная несущая волна** Волна, модулированная таким образом, что несет не только частоту, но и аудио- и видеоинформацию или другую информацию.

**молекула** Частица, состоящая из одного или более атомов. Молекула — это самая малая часть химического вещества, которая сохраняет его химические свойства.

**момент импульса** Сохраняющаяся векторная величина, мера вращательного движения тела. Равен произведению момента инерции на угловую скорость. Единица измерения в СИ — килограмм-метр в квадрате в секунду.

**момент инерции** Свойство тела, мера его инерции вращения. Момент инерции тела зависит от его массы и удаленности от оси вращения. Единица измерения момента инерции в СИ — килограмм, умноженный на метр в квадрате.

**момент силы** Фактор, действие которого на свободное тело приводит в первую очередь к возникновению углового ускорения. Момент силы — векторная величина, которая характеризуется величиной (модулем) и направлением. Единица измерения момента силы в СИ — ньютон-метр.

**мономеры** Небольшие молекулы, из которых состоит полимер.

**мощность** Мера быстроты, с которой производится работа в системе. Единица измерения мощности в СИ — ватт.

**мягкий (о материале)** Материал с низким коэффициентом упругости, то есть реагирующий на значительные деформации с малой возвращающей силой.

**наложение** Перекрывание двух и более волн, в результате которого происходит сложение амплитуд и образуется суммарная волна.

**направление (ориентация)** Линия или траектория, по которой что-то движется или должно двигаться, а также направление, куда смотрит объект.

**направленная энергия** Энергия, которая может быть легко использована для совершения работы.

**напряжение (механическое)** Действующая на тело сила сжатия или растяжения, деленная на площадь, на которую она распределяется.

**напряжение сдвига** Напряжение, которое толкает верхние слои материала влево, а нижние — вправо.

**напряжение сжатия** Напряжение, возникающее при сжатии.

**нарастание потенциала** Количество электростатической потенциальной энергии, которую получает положительный заряд в 1 Кл при прохождении по устройству. Равно потенциалу на выходе из устройства минус потенциал на входе.

**насыщенный** Находящийся в равновесии с другой фазой вещества. Пар является насыщенным, если он находится в равновесии с жидкостью и/или твердой фазой.

**незаряженная (нейтральная) частица** Частица с нулевым суммарным электрическим зарядом.

**нейтрино** Незаряженные частицы, которые почти не имеют массы и образуются в результате радиоактивного распада или других ядерных реакций. С веществом взаимодействуют слабо.

**нейтроны** Незаряженные внутриатомные частицы, которые вместе с протонами образуют атомное ядро.

**нелинейный осциллятор** Осциллятор, в котором на тело действует возвращающая сила, непропорциональная его смещению из положения равновесия. Период колебания нелинейного осциллятора зависит от амплитуды.

**несжимаемое вещество** Вещество, плотность которого не меняется заметно при изменении давления. Жидкости и твердые вещества несжимаемы, поскольку при сильном изменении давления их плотность меняется очень мало.

**несовпадение по фазе (несинхронность)** Взаимодействие двух волн, при котором они одновременно достигают одной и той же точки пространства в противоположных фазах колебаний.

**несущая волна** Электромагнитная волна с одной частотой. Модулируется для передачи аудио- и видеосигнала или цифровой информации.

**неуправляемая (взрывная) цепная реакция** Цепная реакция, при которой каждый акт деления порождает гораздо больше актов деления и скорость деления стремительно растет.

**неупругий удар** Столкновение, при котором первоначальная кинетическая энергия после соударения частично перестает проявляться в виде кинетической энергии.

**неустойчивое равновесие** Состояние равновесия, в которое тело, будучи из него выведено, вернуться не может. В состоянии равновесия на тело не действуют результирующие сила и момент сил. Однако если тело отклоняется от равновесия, результирующие сила и момент сил начинают действовать на него и придают ему ускорение, еще больше удаляющее его от равновесного состояния.

**нормаль** Линия, направленная строго от поверхности, то есть перпендикулярно поверхности. Нормаль проходит под прямым углом к поверхности.

**нормальная сила** Сила реакции опоры.

**нуклон** Общее название частиц, образующих ядро атома, — протонов и нейтронов.

**нулевой закон термодинамики** Если каждый из двух объектов находится в тепловом равновесии с третьим, между ними также устанавливается тепловое равновесие. На этом принципе основано толкование температуры как понятия.

**ньютон (Н)** Единица измерения силы в СИ (то же, что килограмм-метр, деленный на секунду в квадрате). Американская монета достоинством 25 центов имеет вес 1 Н. В Англии принята единица измерения силы фунт, равная 4,45 Н.

**ньютон, деленный на ампер-метр (Н/А-м)** Единица измерения магнитной индукции в СИ (то же, что тесла).

**ньютон, деленный на кулон (Н/Кл)** Единица измерения напряженности электрического поля в СИ (то же, что вольт, деленный на метр).

**ньютон, деленный на метр в квадрате** Единица измерения давления в СИ (то же, что паскаль).

**ньютон-метр (Н-м)** Единица измерения энергии и работы в СИ (то же, что джоуль). Также в СИ — единица измерения момента силы величиной 1 Н, приложенной на расстоянии 1 м от оси вращения. 1 Н-м примерно равен моменту силы, действующему на плечо и вызванному весом бейсбольного мяча, если держать его на вытянутой руке.

**обедненный слой** Непроводящая зона в области р-п-перехода, в которой все валентные уровни заполнены электронами и нет электронов на уровнях проводимости.

**обертон** Целое число, кратное основной частоте колебаний системы. Второй обертон вдвое, а третий втрое больше основной частоты. Вообще говоря, ряд обертонов может быть бесконечным.

**образование зародыша (ядра)** Образование первичного зародыша фазы вещества в объеме другой фазы.

**обратная связь** Использование информации о текущем состоянии системы для управления изменениями, которые вносятся в систему.

**обратно смещенный р-п-переход** Р-п-переход, в котором напряжение полупроводника р-типа уменьшается относительно напряжения полупроводника п-типа.

**обтекаемая форма** Форма тела, зауженная с таким расчетом, чтобы не происходило срыва потока и отделения его от поверхности и не возникало силы сопротивления.

**общая теория относительности** Физические законы, которым подчиняется любое движение, в том числе при скоростях, близких к скорости света, и происходящее в присутствии массивных тел.

**объектив** Первая линза или зеркало телескопа и микроскопа; первый важный оптический элемент, через который проходит испускаемый предметом свет.

**объем** Часть трехмерного пространства внутри определенных границ. Единица измерения объема в СИ — метр кубический.

**окуляр** Крайняя линза телескопа и микроскопа, через которую лучи поступают к глазу.

**омическое сопротивление** Сопротивление, в котором согласно закону Ома возникает напряжение, пропорциональное силе тока.

**ом (Ом)** Единица измерения электрического сопротивления в СИ. При прохождении тока 1 А через резистор с сопротивлением 1 Ом в нем возникает напряжение 1 В.

**орбитальный период (период обращения)** Время, за которое совершается полный оборот по орбите.

**орбиталь** Стоячая волна электрона в атоме, одна из основных мод электронной волны в атоме, разрешенная законами квантовой физики.

**орбита** Траектория, по которой движется тело под воздействием центробежной силы.

**ориентационный порядок** Свойство частиц выстраиваться в определенном направлении.

**основание** Химическое вещество, при растворении в воде которого уменьшается концентрация ионов водорода и повышается рН среды.

**основное состояние** Нижняя энергетическая конфигурация системы; электроны (или другие частицы) занимают квантовые уровни (орбитали, которым соответствуют волновые функции) с наименьшей возможной энергией.

**основные цвета пигмента** Три цвета пигмента — циан (синий), фуксин (пурпурный) и желтый, — которые вбирают в себя три основных цвета (красный, зеленый и синий соответственно). Смешивание трех этих пигментов на белой поверхности позволяет добиться того, что она будет отражать любые сочетания трех основных цветов, то есть позволит глазу воспринимать любые краски.

**основные цвета** Три цвета — красный, зеленый и синий, — которые воспринимаются колбочками (цветочувствительными клетками сетчатки) глаза. Наши глаза способны различать любые цвета как сочетания основных.

**ось вращения** Прямая, вокруг которой вращается тело или группа тел. Точнее говоря, ось вращения направлена вдоль этой прямой согласно правилу буравчика (правого винта).

**ответная вибрация** Перенос энергии между двумя системами с собственным резонансом, которые имеют общую частоту колебаний.

**отжиг** Нагрев материала с целью уменьшить внутреннее напряжение и запустить процесс повторной кристаллизации и роста зерен, после чего материал постепенно охлаждается до комнатной температуры.

**относительная влажность** Фактическая влажность как выраженная в процентах доля абсолютной влажности, необходимая для установления равновесия между водой и паром.

**относительное движение** Движение тела, рассматриваемое в связи с другим телом. Два тела, движущиеся относительно друг друга, имеют разные скорости.

**отражение** Изменение направления распространения волны, когда она целиком или частично возвращается от границы раздела между средами.

**параллельное соединение проводников** Расположение проводников в цепи, при котором ток, подведенный к двум и более проводящим устройствам, разветвляется на разные потоки, проходящие через эти устройства, а затем вновь объединяется в общий ток. Этот ток вызывает равное напряжение в каждом устройстве.

**паскаль (Па)** Единица измерения давления в СИ (то же, что ньютон, деленный на метр в квадрате). Атмосферное давление на уровне моря примерно равно 100 000 Па. Капля воды толщиной 1 мм оказывает давление на руку примерно 10 Па.

**первый закон Кеплера** Все планеты движутся по эллиптическим орбитам, в одном из фокусов которых находится Солнце.

**первый закон Ньютона для вращательного движения** Если тело не раскачивается и на него не действуют внешние моменты сил, оно вращается с постоянной угловой скоростью, равномерно поворачиваясь вокруг фиксированной оси.

**первый закон Ньютона для поступательного движения** Тело, на которое не действуют внешние силы, движется с постоянной скоростью и при прямолинейном движении за равные промежутки времени проходит равные пути.

**первый закон термодинамики** Изменение внутренней энергии стационарной системы равно переданному ей теплу минус работа, которую система совершает над окружающей ее средой. Этот закон переформулирует закон сохранения энергии для термодинамических процессов.

**перегретое вещество** Вещество, нагретое до температуры выше уровня, при котором должен происходить фазовый переход. Перегрев есть следствие ошибки в образовании зародыша новой фазы.

**переменный ток** Электрический ток, направление которого периодически меняется на противоположное. Сокращенно ПТ (англ. AC).

**перенасыщение** Повышение содержания вещества до более высокого уровня, чем позволяет фазовое равновесие. Разделение фаз должно было бы произойти, но не происходит из-за того, что не сформировался зародыш второй фазы, и/или из-за подвижности, не соответствующей образовавшейся перенасыщенной фазе.

**переохлажденное вещество** Вещество, охлажденное до температуры ниже той, при которой должен происходить фазовый переход. Переохлаждение является следствием ошибки в образовании зародыша новой фазы и/или потери подвижности в веществе до создания условий для окончательного формирования новой фазы.

**переходное состояние "стекло — резина"** Состояние между стеклообразным и эластичным, в котором атомы аморфного полимера могут двигаться достаточно свободно для того, чтобы полимер приобрел гибкость и кожистую структуру.

**период** Время, за которое совершается полный цикл повторяющихся движений (колебаний).

**период полураспада** Время, необходимое для радиоактивного распада половины ядер данного радиоактивного изотопа.

**плавление** Фазовый переход, при котором твердое вещество становится жидким.

**плазма** Газообразная фаза вещества, в которую входят частицы, имеющие электрический заряд, — например, ионы и электроны. Плазма отличается от газа сильными электромагнитными взаимодействиями между этими частицами.

**пластификатор** Химическая добавка, которая позволяет снизить температуру стеклования полимера и уменьшить его кристалличность.

**пластическая деформация** Изменение формы под воздействием напряжения, в результате которого происходит необратимая перестановка атомов в материале. После снятия напряжения материал не восстанавливает прежнюю форму.

**пластический (вязкий) излом** Излом материала при пластической деформации, когда под воздействием напряжения слои атомов полностью разделяются.

**пластичность** Способность материала выдерживать обширные пластические деформации, прежде чем произойдет излом.

**плато высокой эластичности** Режим, при котором отдельные атомы аморфного полимера способны свободно двигаться, но цепи перепутаны и не могут перемещаться друг за другом достаточно быстро. Полимер мягкий и эластичный.

**плотность** Масса вещества, деленная на его объем. Единица измерения плотности в СИ — килограмм на кубический метр (кг/м<sup>3</sup>).

**площадь (база) опоры** Площадь на поверхности земли, ограниченная точками опоры тела.

**площадь** Участок двумерной поверхности в пределах определенных границ. Единица измерения площади в СИ — метр в квадрате.

**поверхностное натяжение** Направленное внутрь натяжение, которое проявляется на поверхности с избыточной потенциальной энергией. Поверхностное натяжение стремится как можно сильнее уменьшить площадь.

**поверхностные волны** Нарушение формы устойчивого равновесия на поверхности.

**пограничный слой** Тонкий, прилегающий к поверхности тела слой потока, который при полной скорости внешнего течения остается неподвижным из-за вязкого трения.

**подкритическая масса** Масса способного к ядерному распаду вещества, недостаточная для поддержания цепной реакции.

**подъемные силы** Силы, с которыми поток действует на твердое тело в направлении, перпендикулярном обтекающему телу потоку.

**позитрон** Античастица по отношению к электрону. Позитрон заряжен положительно.

**позиционный порядок** Свойство частиц располагаться определенным образом с одинаковыми интервалами, так что образуется решетка.

**поликристаллический** Состоящий из множества отдельных кристаллов.

**полимер** Гигантская молекула, образованная многочисленными молекулами-мономерами, которые соединяются в прочную цепь. Цепь молекул можно назвать полимером, если по ее длине умещается тысяча и более атомов.

**полимеризация** Процесс образования химических связей между мономерами, формирующими полимер.

**полное внутреннее отражение** Полное отражение световой волны в случае, когда эта волна, падая на границу раздела сред под недостаточно острым углом, не может пройти из среды с более высоким показателем преломления в среду с меньшим показателем преломления.

**положение равновесия** Точка, в которой действующая на тело результирующая сила равна нулю и телу не сообщается ускорение.

**полоса пропускания** Диапазон частот, входящий в некую область электромагнитных колебаний.

**полупроводник n-типа** Полупроводник — например, кремниевый, — который содержит примеси, такие как фосфор, мышьяк, сурьму или висмут, добавляющие электроны на его уровень проводимости.

**полупроводник** Диэлектрик с малой запретной зоной; на перемещение электрона с занятого валентного уровня на свободный уровень зоны проводимости не требуется много энергии.

**полупроводник p-типа** Полупроводник, например кремний, который содержит такие примеси, как бор, алюминий, галлий, индий и теллур, способные выбить электроны с его валентных уровней.

**полый резонатор** Простой электромагнитный резонатор, который состоит из проводящей оболочки строго определенной формы, аналог емкости и катушки индуктивности. Энергия перетекает туда и обратно между электрическим и магнитными полями в полости.

**полярная молекула** Электрически поляризованная молекула, в которой формируется выраженные положительная и отрицательная части.

**поперечная волна** Волна, в которой колебания происходят в направлении, перпендикулярном направлению ее распространения.

**последовательное соединение** Соединение в электрической цепи, при котором ток проходит по одному и более токоприемникам по очереди, прежде чем выйти из последнего. Ток может вызывать разное напряжение в отдельных устройствах.

**постоянная Больцмана** Коэффициент пропорциональности, связывающий давление газа с концентрацией его молекул и температурой. Равна  $1,381 \times 10^{-23}$  Ра·м<sup>3</sup>/К.

**постоянная Планка** Фундаментальная постоянная квантовой физики, равная энергии частицы, деленной на частоту ее волны. Ее численное значение  $6,626 \times 10^{-34}$  Дж·с.

**постоянная Стефана — Больцмана** Коэффициент пропорциональности, который связывает излученную поверхностью энергию с излучательной способностью, температурой и площадью поверхности. Равна  $5,67 \times 10^{-8}$  Дж/с·м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>.

**постоянный магнит** Тело, которое можно намагнитить так, что оно сохранит состояние намагниченности в течение длительного времени.

**постоянный ток** Электрический ток, который всегда течет в одном направлении.

**потенциал** Потенциальная энергия единичного положительного заряда в данной точке электрического поля. Единица измерения потенциала в СИ — вольт.

**потенциальная энергия** Накапливаемая энергия, за счет которой тело может прийти в движение. Потенциальная энергия обусловлена внутренними силами и силами взаимодействия тела с другими телами.

**потенциальная энергия в поле сил тяготения (гравитационная потенциальная энергия)** Потенциальная энергия, обусловленная силами притяжения тел друг к другу.

**потенциальная энергия давления** Произведение объема жидкости или газа на давление. Однако на самом деле эта энергия не накапливается в жидкости и газе. Она обусловлена работой насоса или другого источника, который подает поток.

**потенциальная энергия упругой деформации** Энергия, которая накапливается за счет сил, действующих в теле, подверженном упругой деформации.

**правило правой руки** Правило, по которому определяется направление угловой скорости тела. Если пальцы правой руки согнуть по направлению вращения тела, большой палец укажет направление угловой скорости.

**превращение элементов** Превращение атомов одного элемента в атомы другого в ходе ядерной реакции с изменением числа протонов в ядрах.

**предел текучести** Напряжение, при котором может начаться пластическая деформация материала.

**предел упругости** Максимально допустимая деформация тела, при которой оно способно восстановить первоначальные форму и размеры без остаточной деформации.

**преломление** Отклонение направления распространения волны от первоначального и изменение скорости при пересечении волной границы раздела между средами.

**прецессия** Изменение ориентации оси вращения вращающегося тела под влиянием внешнего момента силы.

**приливные силы** Разница между притяжением одного небесного тела, действующим на данном участке поверхности второго тела, и общим средним притяжением второго тела. Приливные силы стремятся вытянуть второе тело до яйцевидной формы.

**принцип неопределенности Гейзенберга** Закон квантовой физики, согласно которому невозможно в один и тот же момент времени точно указать координаты частицы (корпускулярная характеристика) и импульс (волновая характеристика). Этот закон придает частицам с малой массой свойство нечеткости (расплывчатости).

**принцип Паули** Эмпирическое правило: каждый из одинаковых фермионов имеет собственную волновую функцию, отличную от волновых функций других фермионов.

**принцип эквивалентности** Принцип, согласно которому гравитационная и инерционная масса считаются абсолютно идентичными, а стало быть, в небольшой зоне пространства невозможно экспериментально различить свободное падение и отсутствие силы тяжести.

**проводник** Вещество, по которому могут перемещаться электрические заряды.

**продольная волна** Волна, в которой колебания происходят вдоль направления ее распространения.

**пропускная способность канала (предел Шеннона)** Максимально возможное количество цифровой информации, которую может перенести сигнал за секунду; равно ширине полосы пропускания этого сигнала, умноженной на  $\log_2(1 + \text{сигнал/шум})$ .

**противоположный градиент давления (положительный)** Зона потока, где он направлен в сторону увеличения давления. Поток движется за счет импульса и кинетической энергии, хотя его скорость уменьшается.

**противо-ЭДС** Электродвижущая сила, которая возникает в катушке индуктивности в результате изменения тока или в катушке электромеханической системы (например, электродвигателя) при движении магнитов под действием тока.

**протон** Положительно заряженная элементарная частица, обнаруженная в атомных ядрах.

**прочность на разрыв** Максимальное растягивающее напряжение, которое способен выдерживать материал до тех пор, пока не произойдет разрыв.

**прямосмещенный р-п-переход** Р-п-переход, при котором напряжение полупроводника р-типа возрастает относительно напряжения полупроводника п-типа.

**пучность (в колебаниях)** Область, в которой амплитуда смещения тела максимальна.

**р-п-переход** Граница раздела между полупроводниками р- и п-типа, которая обеспечивает однонаправленное движение электронов в диоде.

**работа** Средство переноса энергии в механике. Работа рассчитывается как действующая на тело сила, умноженная на расстояние, на которое перемещается тело под действием этой силы. Большая сила, приложенная на коротком расстоянии, и малая сила, приложенная на большом расстоянии, производят одинаковую работу. Единица измерения работы в СИ — джоуль.

**равновесие при вращательном движении** Состояние тела, при котором результирующий момент сил равен нулю. Тело имеет постоянный момент импульса.

**равновесие** Состояние тела, в котором действующая на него результирующая сила (или результирующий момент сил) равна нулю. Тело находится в покое или движется равномерно.

**равномерное круговое движение** Движение по кругу с постоянной скоростью. Ускорение тела, совершающего равномерное круговое движение, направлено к центру круга.

**радиан в секунду (1/с)** Единица измерения угловой скорости в СИ. Тело, вращающееся со скоростью 1 радиан в секунду, совершает полный оборот меньше чем за 6,3 секунды.

**радиан в секунду в квадрате (1/с<sup>2</sup>)** Единица измерения углового ускорения в СИ.

**радиан** Естественная единица измерения углов. В полном круге содержится 2π радиан, поэтому в 1 радиане 180/π градусов, что составляет около 57,3°.

**радиоактивный распад** Спонтанный распад ядер на фрагменты.

**радиоволны** Электромагнитные волны, длина которых превышает 1 м.

**радиус-вектор** Вектор, определяющий положение тела относительно некой точки отсчета (начала координат). Характеризуется расстоянием от начала координат до тела и направлением.

**размагничивание** Исчезновение магнитной поляризации в веществе.

**разница в сопротивлении** Скачок сопротивления прохождению волны, обычно сопровождающийся отражением.

**разность потенциалов (напряжение)** Величина электростатической потенциальной энергии, которую теряет положительный заряд в 1 Кл при прохождении по устройству. Падение напряжения равно потенциалу зарядов на входе в устройство минус потенциал зарядов на выходе.

**разомкнутая цепь** Электрическая цепь, разрыв между проводниками которой препятствует протеканию тока.

**распыление (атомизация)** Распыление жидкости в виде капель, настолько мелких, что они висят в воздухе под действием сил сопротивления.

**распыление частиц** Эмиссия атомов, вызванная бомбардировкой поверхности обладающими высокой энергией ионами, атомами и другими "микроснарядами".

**рассеивающая (отрицательная) линза** Линза, при прохождении через которую лучи света отклоняются друг от друга, то есть либо собираются медленнее, чем прежде, либо не собираются вовсе. Рассеивающая линза имеет отрицательное фокусное расстояние и обычно дает действительное изображение.

**расстояние до предмета** Расстояние от линзы до предмета, изображение которого рассматривается.



**расстояние изображения** Расстояние от линзы до изображения, которое она создает. Действительному изображению отвечает положительное расстояние изображения, а мнимому — отрицательное.

**расстояние** Интервал между двумя точками в пространстве. Единица измерения расстояния в СИ — метр.

**растворение** Деление вещества на атомы, молекулы и ионы с рассеиванием их в жидкости.

**растягивающее напряжение** Напряжение, возникающее при растягивании материала.

**растягивающее усилие** Внешние силы, под действием которых тело растягивается.

**растяжение (относительное)** Вызванное напряжением изменение длины предмета, деленное на его первоначальную длину.

**реактопласт** Полимер, цепи которого соединены ковалентными связями, из-за чего образуются гигантские макромолекулы. Реактопласт не может плавиться и переходить в вязкотекучее состояние.

**режим стеклования** Режим, при котором атомы аморфного полимера не могут перемещаться относительно друг друга и полимер становится твердым и непластичным.

**резистор (сопротивление)** Электрический элемент, препятствующий протеканию тока в цепи и превращающий часть его энергии в тепло.

**резонансный перенос энергии** Постепенный перенос энергии к системе с собственным резонансом и от нее, который вызывается небольшими силами, действующими в такт определенной фазе каждого колебательного цикла.

**результатирующая сила** Сумма всех приложенных к телу сил с учетом их величин (модулей) и направлений. Модуль результирующей силы может быть меньше суммы модулей отдельных сил, поскольку эти силы могут действовать в противоположных направлениях.

**результатирующий момент силы** Сумма всех действующих на тело моментов сил с учетом их величин (модулей) и направлений. Модуль результирующего момента сил может быть меньше суммы модулей отдельных моментов, поскольку последние нередко бывают приложены в противоположных направлениях.

**релятивистская механика** Законы механики (движения тел и частиц) в специальной теории относительности. Восполняет неточности ньютоновской механики, которые проявляются при скоростях, сравнимых со скоростью света.

**релятивистская энергия** Энергия тела, выраженная с учетом релятивистской механики и включающая его собственную энергию покоя.

**релятивистский импульс** Импульс частицы, определенный по законам релятивистской механики.

**рентгеновская флуоресценция** Процесс испускания рентгеновского фотона при радиационном переходе электрона с внешней орбитали атома на свободную внутреннюю.

**рентгеновские лучи** Фотоны электромагнитного излучения, обладающие очень высокой энергией.

**рептация (проползание)** Вызванное нагревом движение вперед и назад полимерных цепей — скольжение, благодаря которому распутываются переплетения между молекулами полимера и улучшается текучесть. Это движение напоминает ползание рептилий.

**pH (водородный показатель)** Показатель концентрации ионов водорода, равный отрицательному десятичному логарифму их молярной концентрации.

**рождение электрон-позитронной пары** Образование электрона и позитрона при энергетическом столкновении.

**рычаг** Расстояние по прямой от точки поворота или оси вращения до точки приложения силы.

**рэлеевское рассеяние** Изменение направления света из-за его взаимодействия с частицами вещества.

**сверхкритическая масса** Часть способного к ядерному распаду вещества, превышающая критическую массу и потому подверженная взрывной цепной реакции.

**сверхпроводник** Проводящий материал, в котором электроны могут перемещаться без потери кинетической энергии и превращения ее в тепловую. Электроны способны перемещаться в сверхпроводнике сколь угодно долго. Материал может стать сверхпроводником только при крайне низких температурах.

**свет (излучение)** См. видимый свет, инфракрасное и ультрафиолетовое излучение.

**связь Ван-дер-Ваальса** Очень слабая химическая связь, которая соединяет близко расположенные молекулы благодаря квантовым флуктуациям заряда.

**сдвиг** Пластическая деформации кристалла, которая возникает, когда один слой атомов смещается относительно другого.

**секунда (с или сек)** Единица измерения времени в СИ. За одну секунду принимают длительность 9 192 631 770 периодов излучения при переходе между двумя сверхтонкими уровнями цезия 133 в основном квантовом состоянии.

**селективное отражение света** Отражение света только одной длины волны, или одного цвета.

**сжимаемое вещество** Вещество, плотность которого значительно меняется при изменении давления. Газ сжимаем, поскольку его плотность пропорциональна давлению.

**сигнал** Электрический или оптический способ представления информации.

**сила Лоренца** Сила, действующая на заряженную частицу при движении ее в магнитном поле.

**сила Магнуса** Подъемная сила, действующая на вращающееся тело при движении его в потоке. Сила Магнуса направлена к той стороне мяча, которая уходит от набегающего воздушного потока.

**сила реакции опоры** Сила, возникающая при контакте двух тел. Каждое из тел воздействует на другое с силой, препятствующей перемещению их друг по другу. Сила реакции опоры всегда направлена по нормали, то есть перпендикулярно к поверхностям тел.

**сила сцепления** Максимальная сила трения, которую может развить тело в данной ситуации.

**сила тока** Электрический заряд, проходящий через данную точку или площадь сечения проводника в единицу времени. Единица измерения силы тока в СИ — ампер.

**сила тяги** (реактивная сила) Движущая сила, толкающая тело вперед.

**сила упругости** Сила, пропорциональная смещению и подчиняющаяся закону Гука.

**сила** Фактор, под воздействием которого свободное тело приобретает ускорение, иногда деформируется или еще каким-то образом меняет свое состояние. Сила является векторной величиной и характеризуется численным значением (модулем) и направлением. Единица измерения силы в СИ — ньютон.

**силы Ван-дер-Ваальса** Слабые, ненаправленные силы межмолекулярного взаимодействия, обусловленные временными отклонениями в локализации электрического заряда в атомах и молекулах.

**силы сопротивления** Силы трения, возникающие между потоком и твердым телом в процессе движения тела в потоке. Эти силы вызывают уменьшение относительной скорости тела и потока.

**сильное взаимодействие** Фундаментальная сила, ответственная за структуру ядер и нуклонов, основа ядерных сил.

**система единиц СИ (Международная система единиц)** Система измерения единиц, в которой родственные единицы однозначно задаются через степени 10. В настоящее время система СИ применяется почти во всем мире, в то время как США демонстративно отказываются от ее использования.

**скорость** Векторная величина, мера быстроты изменения местоположения тела — чем выше скорость, тем дальше перемещается тело за секунду. Скорость характеризуется численным значением (модулем) и направлением движения тела. Единица измерения скорости в СИ — метр в секунду.

**скорость (величина)** Путь, который проделывает тело за определенный промежуток времени. Единица измерения скорости в СИ — метр в секунду.

**скорость воздушного потока** Скорость тела относительно воздушной среды, в которой оно движется.

**скорость звука** Скорость распространения звуковых сжатий и разрежений в определенной среде — например, в воздухе или воде.

**скорость истечения** Скорость выходящего газа относительно двигателя ракеты, из которого происходит выхлоп.

**скорость распространения волны** Скорость (модуль и направление) движущегося гребня волны.

**скорость света** Скорость распространения электромагнитной волны в пространстве. В пустом пространстве — вакууме — скорость света равна 299 792 458 м/с.

**скрытая теплота парообразования** Тепло, необходимое для перехода единицы массы вещества из жидкого состояния в пар без изменения температуры.

**скрытая теплота плавления** Тепло, необходимое для перехода единицы массы вещества из твердого состояния в жидкое без изменения температуры.

**слабое взаимодействие** Фундаментальная сила, которая позволяет электронам и нейтрино взаимодействовать друг с другом и является причиной бета-распада.

**собирающая (увеличительная) линза** Линза, которая отклоняет лучи проходящего через нее света друг к другу, так что они либо быстрее, чем прежде, сходятся, либо по крайней мере не так быстро расходятся. Собирающая линза имеет положительное фокусное расстояние и обычно дает действительное изображение.

**собственный (остественный) резонанс** Механический процесс, при котором энергия изолированной системы вынуждает ее совершать определенные повторяющиеся движения. Интенсивность этих движений зависит от физических свойств системы.

**совпадение по фазе** Взаимодействие двух волн, при котором они одновременно и в одной точке пространства завершают одинаковые доли своих колебательных циклов.

**сольватная оболочка** Группа ориентированных определенным образом молекул жидкости, которые окружают молекулу или ион и переносят их в объеме раствора.

**сопротивление** давления Сила сопротивления, которая возникает, когда давление перед телом больше давления позади него.

**составляющие вектора** Слагаемые вектора, которые проходят вдоль определенных направлений; проекции вектора на оси координат.

**состояние** Возможное расположение электронов (или других частиц) в квантовой системе.

**сохраняющаяся величина** Физическая величина — например, энергия, — которая под действием разных факторов в изолированной системе не возрастает и не уменьшается. Сохраняющаяся величина может переходить от тела к телу, но ее суммарное значение не меняется.

**спектр черного тела** Распределение теплового электромагнитного излучения, испускаемого черным телом. Представляет собой набор излучений определенных длин волн и зависит только от температуры черного тела.

**специальная теория относительности** Законы физики, описывающие все виды движения, включая происходящие на скоростях, сравнимых со скоростью света.

**спонтанное (самопроизвольное) излучение** Испускание света при случайном высвобождении возбужденным атомом или атомоподобной системой накопленной энергии в процессе радиационного перехода. В таком случае образуется независимый единичный фотон.

**способность к ядерному распаду** Способность подвергаться вызванному ядерному распаду.

**спутный след** Турбулентный след, который оставляет за собой движущееся в потоке тело.

**срыв потока** Остановка и неправильное течение стабильного потока. При аэродинамическом обтекании крыла это означает отделение потока воздуха, спровоцированное срывом вблизи поверхности крыла.

**статическая устойчивость** Равновесие тела в отсутствие движения.

**статические отклонения** Изменения физической величины, например давления, причиной которых не является движение.

**стекло** Некристаллическое вещество, структура которого не имеет дальнего порядка (не упорядочена на протяжении сколь угодно больших расстояний).

**стоячая волна** Волна, в которой все пучности остаются на месте.

**сублимация (возгонка)** Процесс перехода атомов и молекул из твердой фазы непосредственно в газообразную.

**суммарная магнитная масса полюсов** Сумма всех магнитных масс (величин) полюсов тела, северных и южных. Поскольку изолированных магнитных полюсов не бывает, суммарная магнитная масса полюсов всегда равна 0.

**суммарный электрический заряд** Сумма всех положительных и отрицательных зарядов, присутствующих в данном веществе или теле. Положительные заряды увеличивают, а отрицательные уменьшают суммарный заряд. Суммарный заряд может быть отрицательным.

**схема (электрическая)** Символическое изображение принципиального устройства электрического прибора.

**тврдоо вещество** Состояние вещества, при котором частицы (атомы или молекулы) соприкасаются и не могут свободно перемещаться относительно друг друга. Твердое вещество имеет определенную форму и объем.

**тврдость** Свойство материала сопротивляться внедрению в него инородного тела.

**тембр** Сочетание тонов звука музыкального инструмента, характерное для данного инструмента.

**температура** Мера средней внутренней кинетической энергии, приходящейся на одну частицу вещества. Для газов температура характеризует среднюю кинетическую энергию отдельных атомов и молекул.

**температура кипения** Пороговая температура, при которой начинается стабильное образование пузырей пара в объеме жидкости.

**температура плавления** Температура, при которой сосуществуют в равновесии твердая и жидкая фазы вещества.

**температура стеклования** Температура, ниже которой атомы жидкого вещества не могут перемещаться и вещество реагирует на напряжение сдвига упруго.

**тепловая машина** Устройство, при передаче тепла от горячего тела к холодному превращающее тепловую энергию в работу.

**тепловая энергия** Энергия неупорядоченных процессов, которая проявляется как кинетическая и потенциальная энергия отдельных атомов и молекул вещества. Из-за хаотического распределения эта неупорядоченная форма энергии не может быть использована непосредственно для совершения полезной работы. Тепловую энергию называют также внутренней энергией и теплотой.

**тепловое движение** Неупорядоченное движение частиц вещества, обусловленное его внутренней, или тепловой энергией.

**тепловое излучение** Передача тепла за счет прохождения электромагнитного излучения от одного тела к другому.

**тепловое равновесие** Состояние, при котором в системе не происходит передачи тепла, потому что все ее компоненты имеют одинаковую температуру.

**тепловой насос** Устройство, передающее тепло в направлении, противоположном его естественной передаче, от холодного вещества к нагретому. Тепловой насос обычно превращает часть внешней энергии в тепловую, поэтому противоречия второму закону термодинамики нет.

**тепловые нейтроны** Нейтроны, которые движутся только благодаря тепловой энергии, и при определенной температуре их кинетическая энергия не меняется.

**теплоемкость** Количество тепла, которое необходимо передать телу, чтобы его температура поднялась на 1 градус.

**теплообменник** Устройство, которое позволяет естественным порядком передавать тепло от более нагретого вещества к холодному в отсутствие непосредственного контакта этих веществ.

**теплопроводность** Мера способности тела передавать тепло путем перераспределения его из нагретой зоны в холодную.

**теплопроводность** Прохождение тепла в веществе за счет передачи энергии от одного атома или молекулы к другим. Сами атомы при нагревании не смещаются. В металлах свой вклад в теплопроводность вносят и подвижные электроны.

**тепло** Энергия, которая переходит от одного тела или вещества к другому благодаря разности их температур.

**термистор (терморезистор)** Полупроводниковый датчик температуры, реагирующий на повышение температуры резким повышением проводимости.

**термопара** Металлический датчик температуры, который состоит из двух разных металлов, подсоединенных к двум контактам и отвечающих на разницу температур между контактами электрическим сигналом.

**термопласт** Полимер, в состав которого входят не связанные между собой цепи-макромолекулы. В целом термопласты могут плавиться до текучести, но некоторые из них разрушаются или горят еще до плавления.

**термоэлектронная эмиссия** Эмиссия электронов, происходящая, когда тепловая энергия нагретой поверхности вызывает их отрыв от этой поверхности.

**тесла (Тл)** Единица измерения магнитной индукции в СИ (то же, что ньютон, деленный на ампер-метр).

**тормозное (синхротронное) излучение** Процесс, в котором разгоняющиеся заряженные частицы испускают электромагнитное излучение, как правило, рентгеновское или гамма-фотоны.

**траектория** Путь, по которому движется тело.

**транзистор** Электронное устройство, позволяющее контролировать большой ток с помощью очень маленького заряда, движущегося или неподвижного.

**трансформатор** Прибор, в котором для переноса электроэнергии от одной цепи к другой используется магнитное поле. Заряды не перетекают из цепи в цепь, поэтому эти цепи электрически изолированы друг от друга.

**трение покоя** Силы сопротивления относительно движению в случае, когда к двум соприкасающимся поверхностям приложены внешние силы, которые могут вызвать скольжение.

**трение** Сила, препятствующая относительно смещению двух контактирующих поверхностей. Силы трения направлены параллельно поверхностям и против относительного смещения.

**трение скольжения** Силы сопротивления движению, возникающие при скольжении друг по другу соприкасающихся поверхностей.

**третий закон Кеплера** Квадрат орбитального периода (периода обращения) планеты пропорционален кубу среднего удаления ее от Солнца.

**третий закон Ньютона для вращательного движения** Момент силы, действующий со стороны одного тела на другое, равен по величине и противоположен по направлению моменту силы, действующему на первое тело со стороны второго.

**третий закон Ньютона для поступательного движения** Сила, с которой одно тело действует на другое, равна по величине и противоположна по направлению силе, с которой второе тело действует на первое.

**третий закон термодинамики** По мере приближения температуры тела к абсолютному нулю его энтропия также стремится к нулю. Этот закон говорит о том, что абсолютный нуль, при котором исчезает всякая неупорядоченность, недостижим.

**туннельный эффект** Согласно принципу неопределенности Гейзенберга невозможно точно определить координаты частицы, поэтому она может случайно преодолеть энергетический барьер и оказаться в запретной с точки зрения классических законов зоне. Это квантовое явление называется туннельным эффектом, или туннелированием.

**тупой (о форме тела)** Необтекаемый; прилегающий к телу поток замедляется и разделяется (срывается), а сила сопротивления возрастает.

**турбулентная отклоняющая сила** Подъемная сила, действующая на закрученный мячик, когда тот отклоняет в сторону свой спутный след. Эта сила направлена к той стороне мячика, которая уходит от набегающего потока.

**турбулентный поток** Неравномерное, нестабильное и непредсказуемое течение потока, когда его соседние части могут мгновенно оказаться далеко друг от друга.

**турбуленция** Непредсказуемые завихрения и закрутки потока.

**угловая координата** Параметр, который описывает ориентацию тела относительно какого-то исходного направления.

**угловая скорость** Векторная величина, которая показывает, как быстро меняется угловая координата тела: чем выше угловая скорость, тем быстрее поворачивается тело за секунду. Характеризуется численным значением угловой скорости (модулем) и направлением, вокруг которого поворачивается тело. Вектор угловой скорости направлен вдоль оси вращения согласно правилу буравчика (правого винта). Единица измерения угловой скорости в СИ — радиан в секунду.

**угловая скорость, модуль** Величина угла, на который поворачивается тело за единичный интервал времени.

**угловое ускорение** Векторная величина, которая показывает, как быстро меняется угловая скорость тела: чем больше угловое ускорение, тем заметнее будет изменение угловой скорости тела за секунду. Характеризуется численным значением и направлением, в котором происходит ускорение. Направление углового ускорения совпадает с направлением момента силы, вызвавшего это ускорение. Единица измерения углового ускорения в СИ — радиан в секунду в квадрате.

**угол атаки** Угол наклона аэродинамического профиля относительно обтекающего его воздушного потока.

**угол Брюстера** Угол, при котором вертикально поляризованный свет не отражается от горизонтальной прозрачной поверхности. Величина угла зависит от показателя преломления поверхности.

**ударная волна** Узкая область высоких давления и температуры, возникающая, когда скорость движения тела в среде превышает скорость распространения звука, волн или других колебаний в той же среде.

**ударная прочность** Показатель способности материала поглощать механическую энергию не разрушаясь.

**удельная теплоемкость** Количество тепла, которое необходимо передать единице массы вещества, чтобы поднять его температуру на одну единицу. Единица измерения удельной теплоемкости в СИ — джоуль, деленный на килограмм-градус.

**узел (в колебаниях)** Область, в которой амплитуда смещения тела равна нулю.

**уклон (пандус)** Наклонная плоскость, которая дает возможность производить работу по перемещению тела на большее расстояние при меньших затратах силы.

**ультрафиолетовый свет** Невидимый свет с длинами волн меньше 400 нанометров.

**унос** Явление захвата частиц или части потока другим потоком.

**упругая деформация** Вызванное напряжением изменение формы, при котором в материале не происходит остаточного перемещения атомов. После снятия напряжения материал принимает первоначальную форму.

**упругий удар** Соударение, при котором вся кинетическая энергия, имевшаяся до столкновения, после вновь проявляется как кинетическая энергия.

**упругое рассеяние** Процесс, при котором две частицы отскакивают друг от друга после соударения без потери кинетической энергии.

**уравнение состояния идеального газа** Уравнение, связывающее давление, температуру и концентрацию идеального газа. Идеальным считается газ, молекулы которого не взаимодействуют друг с другом за исключением моментов их соударений.

**уровень проводимости** Квантовый уровень диэлектрика, для перехода на который требуется энергия, превышающая уровень Ферми; обычно не занят электронами.

**уровень Ферми** Гипотетический энергетический уровень, расположенный между высшим занятым и нижним свободными уровнями энергии в твердом веществе.

**усиливающая интерференция** Интерференция, при которой в одной и той же области пространства одновременно возникают две или больше совпадающих по фазе волн, что дает очень сильный эффект.

**усилитель** Устройство, которое делает входной сигнал более сильным на выходе.

**ускорение** Векторная величина, показывающая, насколько быстро меняется скорость тела: чем выше ускорение, тем сильнее меняется скорость за каждую секунду. Ускорение характеризуется модулем (численным значением) и направлением, в котором тело движется с ускорением. Направление ускорения совпадает с направлением силы, его вызывающей. Единица измерения ускорения в СИ — метр в секунду в квадрате.

**ускорение свободного падения** Физическая константа, которая связывает вес тела с его массой и говорит о том, как быстро меняется скорость свободно падающего тела. Вблизи поверхности Земли ускорение свободного падения равно  $9,8 \text{ м/с}^2$  ( $9,8 \text{ Н/кг}$ ).

**усталость металла** Повреждение металла при действиях, которые способствуют распространению вглубь поверхностных дефектов, например трещин и царапин.

**установившееся течение** Состояние потока, при котором в любой данной точке его свойства не меняются во времени.

**устойчивое равновесие** Состояние равновесия, в которое тело возвращается после смещения или деформации. В состоянии равновесия на тело не действуют результирующие сила и момент сил. Если тело отклоняется от состояния устойчивого равновесия, результирующая сила и момент сил начинают действовать на него и возвращают его в равновесие.

**фаза** Форма существования вещества — жидкая, твердая, газ, плазма.

**фазовое равновесие** Состояние, при котором сосуществуют две фазы вещества и ни одна из них не прирастает за счет другой.

**фазовый переход** Превращение одной фазы вещества в другую.

**фарад (F)** Единица измерения электрической емкости в СИ. В конденсаторе емкостью 1 фарад при заряде каждой обкладки, отрицательно и положительно заряженной, по 1 кулону возникает разность потенциалов между обкладками 1 вольт.

**фермионы** Класс фундаментальных частиц, который включает электроны, протоны и нейтроны; подчиняется принципу Паули.

**ферритмагнетик** Вещество, атомы которого имеют противоположно направленные магнитные спины, но отличаются по величине магнитного момента, поэтому магнитные свойства не пропадают полностью.

**ферромагнетик** Вещество, атомы которого в пределах магнитного домена имеют одинаковую магнитную ориентацию.

**фокусное расстояние** Длина отрезка за собирающей линзой, при которой формируется действительное изображение удаленного тела. Фокусное расстояние рассеивающей линзы отрицательно, это длина отрезка перед линзой, при которой формируется мнимое изображение удаленного тела.

**формула линзы** Уравнение, связывающее фокусное расстояние с расстояниями до предмета и его изображения.

**фотодиод** Диод, который при облучении светом позволяет пропускать ток через p-n-переход в обратном направлении. Свет дает энергию, необходимую для перемещения зарядов через обедненную зону в запрещенном направлении. Ток, который протекает по фотодиоду в обратную сторону, пропорционален интенсивности света.

**фотон** Частица (квант) света, обладающая энергией и моментом импульса, но не имеющая массы.

**фоторезистор** Твердое вещество, которое в темноте проявляет свойства диэлектрика, а под действием света с определенной длиной волны способно проводить ток.

**фотоэффект** Процесс поглощения атомом фотона при излучательном переходе, в результате чего атом испускает электрон.

**фундаментальные силы** Четыре главные силы взаимодействия тел во Вселенной — сила притяжения, электромагнитная сила, сильное и слабое ядерные взаимодействия.

**хаос** Непредсказуемое течение процесса, когда мельчайшее изменение исходного состояния системы приводит к самым разным конечным состояниям. С каждой секундой эти различия нарастают все быстрее.

**хаотическая система** Динамическая система, чрезвычайно чувствительная к исходным условиям. Малейшие изменения в неупорядоченной системе могут привести к разнообразным итоговым состояниям.

**характеристическое рентгеновское излучение**

Рентгеновские лучи, которые испускает атом при рентгенофлуоресценции. Их энергии определяются структурой атомных орбиталей.

**химическая потенциальная энергия** Энергия, запасенная силами химического взаимодействия атомов. Эти силы имеют электромагнитную природу.

**химическая реакция** Взаимодействие двух и более атомов и молекул, в результате которого происходит перераспределение атомов с образованием новых атомов и молекул.

**хрупкий излом** Излом материала без пластической деформации, при котором слои атомов полностью разделяются под воздействием напряжения.

**хрупкость** Свойство материала разрушаться под действием напряжений по типу хрупкого излома.

**цветовая температура** Температура, при которой черное тело испускает тепловое электромагнитное излучение с определенным спектром длин волн.

**центр масс** Специфическая точка, относительно которой уравнивается масса тела. Для свободного тела центр масс является естественным центром вращения. В отсутствие внешних сил и моментов сил центр масс твердого тела движется с постоянной скоростью, а тело вращается вокруг центра масс с постоянной угловой скоростью.

**центростремительная сила** Сила, действующая на тело и направленная к центру круговой траектории. Это не независимая сила — она складывается из других приложенных к телу сил, в том числе силы тяжести.

**центростремительное ускорение** Ускорение, всегда направленное к центру траектории-окружности.

**центр тяжести** Специфическая точка, относительно которой вес тела распределен равномерно, то есть тело уравновешено. Поскольку вес пропорционален массе, для тел, намного меньших Земли, центр масс совпадает с центром тяжести. Для более крупных тел центр масс и центр тяжести несколько отличаются. Тело, подвешенное в центре тяжести, уравновешено и не испытывает действия суммарного момента сил тяжести. Во многих случаях можно точно предсказать поведение тела, исходя из предположения, что все составляющие его веса действуют как центр тяжести.

**центр удара** Специфическая точка на бите и ракетке, при ударе о которую другое тело не сообщает ускорения ручке биты и ракетки.

**цепная реакция** Процесс, в котором одно превращение запускает одно и более подобных превращений, так что реакция становится самоподдерживающейся.

**цепь короткого замыкания** Дефект электрической цепи, при котором ток обходит нагрузку, которую должен был бы привести в действие.

**циклотронное вращение** Круговое или спиральное движение заряженной частицы в магнитном поле. Заряженная частица обычно образует петлю вокруг линий магнитной индукции.

**цифровое представление** Представление числовых значений в виде совокупности единичных разрядов, каждому из которых отвечают дискретные значения физических величин, например напряжения, заряда или давления.

**частота** Число полных циклов колебаний, которые проходит колебательная система за определенный период времени. Единица измерения частоты в СИ — герц.

**частотная модуляция** Способ воспроизведения звука или других сигналов при изменении частоты волны.

**черная дыра** Космическая область, как правило, сферической формы, внутри которой сопряженные с гравитацией искажения пространства и времени настолько велики, что она даже не испускает света.

**число Рейнольдса** Безразмерный параметр, характеристика потока. При малых числах Рейнольдса свойства потока определяются вязкостью, а при высоких — его инерцией.

**шкала Кельвина** Шкала измерения температур, в которой абсолютному нулю соответствует 0 К. Интервал между ближайшими значениями (цена деления) совпадает с таковым по шкале Цельсия.

**шкала Фаренгейта** Шкала температур, в которой за температуру таяния льда принимается 32 °F, а за температуру кипения воды на уровне моря — 212 °F. Абсолютный нуль равен -459,67 °F.

**шкала Цельсия** Температурная шкала, в которой за 0 °C принята температура таяния льда, а за 100 °C — температура кипения воды на уровне моря. Абсолютный нуль по этой шкале равен -273,15 °C.

**щелочная среда** Среда, pH которой выше 7.

**звтектическая смесь** Сплав или раствор двух и более веществ, температура которого ниже температур плавления отдельных компонентов.

**ЭДС индукции (наведенная ЭДС)** Общее напряжение между концами катушки индуктивности, возникающее при изменении магнитного поля в этой катушке и результирующего электрического поля.

**электрическая поляризация** Неоднородное распределение электрического заряда с формированием в теле положительно и отрицательно заряженных зон.

**электрическая цепь** Замкнутая цепь (контур) проводников, нагрузок (устройств, потребляющих электрическую энергию) и источников питания, по которой электрический ток может протекать постоянно.

**электрический заряд** Присущее веществу свойство, благодаря которому между заряженными частицами могут возникать электростатические силы. Электрический заряд — это сохраняющаяся величина. Может быть положительным и отрицательным. Единица измерения электрического заряда в СИ — кулон.

**электрический ток** Движение электрического заряда.

**электрическое сопротивление** Мера способности тела препятствовать протеканию электрического тока. Единица измерения сопротивления в СИ — ом.

**электромагнит** Катушка провода с железным сердечником или без него, которая намагничивается при протекании по проводу тока.

**электромагнитные волны** Волны, которые состоят из электрического и магнитного полей, распространяющиеся в вакууме со скоростью света. Электромагнитные волны несут энергию и импульс, испускаются и поглощаются как частицы, так называемые фотоны. Радиоволны, волны в СВЧ-печах, инфракрасное, видимое, ультрафиолетовое, рентгеновское и гамма-излучение — примеры электромагнитных волн.

**электронвольт (эВ)** Единица энергии, равная энергии, выделившейся при перемещении элементарной заряженной частицы (электрона или протона) между точками с разницей потенциалов 1 В. 1 эВ примерно равен  $1,602 \times 10^{-19}$  Дж.

**электронная лампа** Устройство, в котором поток электронов, перемещающихся в вакууме между нитью накала (катодом) и пластиной (анодом), регулируется небольшим зарядом одной или более управляющих сеток.

**электронная оболочка** Группа атомных орбиталей с равными энергиями.

**электронная оболочка** Квантово-механическая структура в атоме, в пределах которой стоячие волны электронов сходны по структуре и энергии. Атомы с заполненной электронной оболочкой химически стабильны.

**электроны** Крошечные отрицательно заряженные частицы, образующие внешнюю часть атомов, основные переносчики электричества и тепла в металлах.

**электростатическая потенциальная энергия** Энергия, обусловленная силами взаимодействия электрических зарядов.

**электростатическая сила** Сила, действующая на заряженную частицу в присутствии других заряженных частиц.

**электростатическое поле** Свойство пространства воздействовать на заряженные частицы в каждой точке. Электростатическое поле имеет направление и величину, пропорциональную силе, с которой оно действует на единичный положительный заряд в данной точке. Хотя электростатические поля зачастую создаются ближайшими частицами, их могут вызывать и другие электромагнитные явления. Единица измерения напряженности электростатического поля в СИ — вольт, деленный на метр, или, что то же самое, ньютон, деленный на кулон.

**элементарные частицы** Основные “кирпичики” Вселенной, из которых строятся атомы и вещества.

**элементарный электрический заряд** Фундаментальная величина электрического заряда, примерно равная  $1,6 \times 10^{-19}$  Кл.

**энергетическая зона** Область энергетических уровней твердого вещества со схожими стоячими волнами и, следовательно, близкими энергиями.

**энергетический уровень** Стоячая волна электрона в твердом веществе, один из основных режимов волн электрона, разрешенных законами квантовой физики в твердом веществе.

**энергия активации** Энергия, необходимая для того, чтобы началась химическая реакция. Эта энергия расходуется на разрыв или ослабление связей в исходных веществах, в результате чего может пойти реакция с образованием новых продуктов.

**энергия отскока** Кинетическая энергия, которую вновь приобретают два тела после того, как они ударятся друг о друга и разлетятся.

**энергия соударения** Кинетическая энергия, которую теряют два тела при соударении.

**энергия** Способность совершать работу. Каждое тело имеет определенный запас энергии, и вычисляют его как работу, которую способно совершить тело в идеальных условиях. Единица измерения энергии в СИ — джоуль.

**энергия Ферми** Энергия электрона на уровне Ферми.

**энтропия** Физическая величина, мера неупорядоченности системы. При абсолютном нуле энтропия равнялась бы нулю.

**эффект Бернулли** Снижение давления при повышении скорости равномерного направленного потока несжимаемой жидкости.

**эффект Вентури** Повышение скорости и уменьшение давления несжимаемой жидкости при равномерном протекании по узкой трубе.

**эффект Доплера** Отличие частоты исходной волны от частоты волны принимаемой, вызванное относительным движением источника и приемника.

**эффект Зеебека (термоэлектрический эффект)** Перенос заряда между зонами металла, одна из которых нагрета больше другой. Вызывается тепловым движением электронов проводимости, которые стремятся уйти из более нагретой зоны и скапливаются в холодной\*.

**эффективное (действующее) напряжение** Величина напряжения переменного тока, определяемая как напряжение постоянного тока, при котором омическое устройство потребляет такую же среднюю мощность.

**эффект Комптона (комптоновское рассеяние)** Процесс столкновения фотона с заряженной частицей, как правило, электроном. При соударении фотон и заряженная частица обмениваются энергией и импульсами.

**ядерная сила** Сила притяжения, которая связывает нуклоны, когда они соприкасаются.

**ядерный синтез** Слияние двух маленьких ядер с образованием более крупного ядра. В процессе синтеза нуклоны связываются ядерной силой с высвобождением энергии.

**ячейка конвекции** Петля потока, закрученного в результате конвекции. Как правило, в более нагретой зоне ячейки конвекции поток поднимается, а в холодной опускается.

\* В общепринятой формулировке эффект Зеебека — это явление возникновения ЭДС в электрической цепи, состоящей из последовательно соединенных разнородных проводников, контакты между которыми находятся при различных температурах.





# ИСТОЧНИКИ ФОТОГРАФИЙ

---

## Глава 1

---

С. 19, 22, 31: Courtesy Lou Bloomfield. С. 33: Courtesy Jerry Ohlinger's Movie Material Store. С. 41, 42, 43, 44: Courtesy Lou Bloomfield.

## Глава 2

---

С. 49: Courtesy Lou Bloomfield. С. 50: Courtesy NASA. С. 55, 63, 65: Courtesy Lou Bloomfield. С. 73: Courtesy US NHTSA. С. 76 (слева), 75 (справа): Courtesy Lou Bloomfield.

## Глава 3

---

С. 80,82: Courtesy Lou Bloomfield. С. 83: Courtesy NASA. С.87, 89, 92: Courtesy Lou Bloomfield. С. 100: Courtesy NASA. С. 101: Courtesy Karen Bloomfield.

## Глава 4

---

С. 111: Courtesy Lou Bloomfield. С. 114: Courtesy NASA. С. 116: Courtesy New York Public Library. С. 124: Courtesy NASA. С. 135, 138: Courtesy Lou Bloomfield.

## Глава 5

---

С. 147, 150 (слева): Courtesy Lou Bloomfield. С. 150 (справа): Courtesy Fredrik Fatemi. С. 151: Courtesy NASA. С. 159: Department of Water and Power of the City of Los Angeles.

## Глава 6

---

С. 171: Courtesy Lou Bloomfield. С. 172 Courtesy Peter Bradshaw, Stanford University. С. 179: Courtesy Lou Bloomfield. С. 180: Courtesy Rebus, Inc. С. 187, 188: Courtesy Thomas Miller. С. 189, 191, 192, 193, 198: Courtesy Lou Bloomfield.

## Глава 7

---

С. 214: Courtesy Travis Industries. С. 217: Courtesy Lou Bloomfield. С. 218: Courtesy Bryant Heating and Cooling. С. 220, 225, 229, 230, 232, 233, 234, 236, 240, 241, 242, 246: Courtesy Lou Bloomfield. С. 248: Courtesy NASA. С. 249, 250, 252, 257, 258, 262: Courtesy Lou Bloomfield.

## **Глава 8**

---

C. 271: Courtesy of Bryant Heating and Cooling. C. 273: Courtesy Lou Bloomfield.  
C. 280: Courtesy of BMW Corporation. C. 288, 289: Courtesy Lou Bloomfield.

## **Глава 9**

---

C. 313, 315, 317, 328, 329, 330, 336, 337: Courtesy Lou Bloomfield.

## **Глава 10**

---

C. 330, 334, 338, 339, 342, 344, 347: Courtesy Lou Bloomfield.

## **Глава 11**

---

C. 374, 375, 377, 378, 379, 382, 385, 390, 396, 398, 400, 401, 403, 404, 405, 412, 415: Courtesy Lou Bloomfield.

## **Глава 12**

---

C. 419, 428, 429, 434, 435: Courtesy Lou Bloomfield.

## **Глава 13**

---

C. 459, 464: Courtesy Lou Bloomfield.

## **Глава 14**

---

C. 479, 480, 488, 493, 494: Courtesy Lou Bloomfield. C. 475: Courtesy SDL, Inc.

## **Глава 15**

---

C. 511, 514, 519, 540, 541: Courtesy Lou Bloomfield.

## **Глава 16**

---

C. 550: Courtesy Lou Bloomfield. C. 556 (слева): Courtesy U.S. Department of Energy. C. 556 (справа): Courtesy Defense Nuclear Agency. C. 558: Courtesy: Los Alamos Scientific Laboratory, University of California.

## **Глава 17**

---

C. 584, 594: Courtesy Lou Bloomfield. C. 609: Courtesy of Steven Chu. C.

# ПРЕДМЕТНО-ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

## **абберации оптической системы**

астигматизм 518  
кома 518  
сферическая 518  
хроматическая 518, 542

## **аварии**

автомобильная авария 73, 74, 111  
бостонская авария 588  
дирижабли 152  
обрушение Такомаского моста 325  
"Титаник" 588  
"Челленджер" 175  
ядерных реакторов 567, 569, 570

## **автомобиль** 21, 63–65, 73, 74, 99, 168, 276–280, 282–291

аккумулятор 655–657  
зоны смятия 73  
лобовое стекло 602  
привод 64, 65  
трансмиссия (коробка передач) 283–287

## **адаптер, см. блок питания**

## **аддитивная система цветов** 484

## **азот** 145, 165, 166, 241, 294, 622

## **акваланг** 163–166

## **аккумулятор, см. батарея**

## **алмаз** 221, 602–605

## **алюминий** 93, 221, 223, 228, 253, 256

алюминиевая фольга 250  
анодированный алюминий 228  
оксид алюминия 228, 605

## **американские горки** 98, 100–104

выбор места 103, 104  
мертвая петля 101–103

## **Ампер Андре-Мари** 380

## **ампер** 364

## **ампер-метр** 374

## **анод** 429, 466

## **антивещество** 578

## **антистатика** 349, 350

## **антиферромагнетики** 374, 412

## **аргон** 145, 241

## **Аристотель** 18, 19

## **арсенид галлия** 427

## **Архимеда закон** 148, 149, 155, 202

## **атмосферное давление** 147, 235

**атом** 144, 145, 217, 218, 320, 343, 375, 423, 485, 486, 551, 552, 555, 557, 650  
квантовая структура 320  
колебания 241  
орбиталь 423, 485–487  
электронная оболочка 343, 486  
ядро 320, 343, 551–555, 557, 560, 579

## **атомная бомба** 550, 551, 555, 560, 564, 566

## **атомный номер** 650

## **аттракцион "автодром"** 66–73

## **аудиовоспроизведение** 415

## **аудиозапись** 435

## **аустенит** 589, 590

## **аэродинамика** 117, 178, 180, 290

аэродинамическая сила 117, 124, 178, 180, 188, 203–205  
аэродинамические системы 178  
аэродинамический момент 183

## **байт** 439

## **баллистическое движение** 29

## **Баннекер Бенджамин** 317

## **Бардин Джон** 437

## **барометр** 296

**батарея** 365, 366, 368, 420, 650, 651, 654–657  
литиевая 365, 658, 661, 662  
никель-кадмиевая 658, 660–662  
никель-металлгидридная 662  
ртутно-цинковая 660  
серебряно-цинковая 660

угольно-цинковая 658–662  
хлоридно-аммониевая 658  
хлоридно-цинковая 658  
щелочная ("алкалиновая") 365, 366, 658–662

## **бегущая волна** 328, 331, 335, 336

## **Беккерель Антуан Анри** 554

**бензин** 278, 281, 284, 619, 620, 623–625, 629, 631, 632, 647  
детонационная стойкость 624  
летучесть 623, 624  
октановое число 624, 625, 631, 632

## **Бернелл Джоселин Белл** 313

**Бернулли Даниил** 159, 161, 171, 208  
уравнение Б. 159, 160, 170, 172, 174, 178, 179, 188, 193

## **Бессемера конвертер** 592

## **бетон** 590

## **бильярдный шар** 27, 94–97

## **Бимс Джесс** 104

## **Бинниг Герд** 548

## **бинокль** 539, 541

## **бит** 416, 417, 438, 439

**блок питания (адаптер)** 420–422, 430, 431  
импульсный 432, 433  
конденсатор 421, 422, 430–432, 443  
трансформатор 421, 431, 432

## **бозон** 493

## **Браге Тихо** 120, 128

## **Браттейн Уолтер** 437

## **Браун Вернер фон** 124

## **Брюстера угол** 482

## **бумеранг** 204, 206

## **бутан** 624, 627, 630

## **вакуумные лампы** 446

- валентная зона** 426  
валентный уровень 426–428
- Ван де Граафа генератор** 349
- ватт** 60, 364
- велосипед** 21, 32, 40, 106–113
- Венера** 127
- Вентури эффект** 209, 280
- вертикальная поляризация** 453, 455
- вертолет** 200, 201
- вес** 26, 27, 29, 32, 38, 46, 47, 58, 64, 78, 84, 85, 100–102  
кажущийся вес 99, 101, 102
- Вестингауз Джордж** 385
- весы** 78–87  
безмен 81, 82  
медицинские 87  
напольные 82, 85  
погрешности измерений 84  
пружинные 78, 79, 81, 82, 84  
Роберваля 86, 87  
рычажные 85, 86  
с зубчато-реечным механизмом 81, 82, 84  
электронные 84
- ветры** 295  
возникновение 294  
высотные 295, 297–299  
глобальные 297, 298  
катабатические (стоковые) 296  
периодические 296  
приземные 295–299
- ветряной генератор** 213
- вечный двигатель** 291, 292
- Видемана — Франца закон** 221
- видеомагнитофон** 415, 416
- видимый свет** 221, 222, 237, 238, 250, 293, 300, 476
- винт** 75, 135, 136, 174, 175
- вихревые токи (токи Фуко)** 391
- внутренняя энергия (теплота)** 59, 269
- вода** 145, 153–165, 168–174, 219, 223, 230–236, 300, 458, 459  
давление 153, 154, 156–158, 160, 170, 172  
линии тока 159, 161, 171  
нестационарный поток 160  
очистка 302  
дистилляция 302–305  
замораживание 306, 307  
обратный осмос 307–309  
опреснение 303–305, 307–309  
фильтры для очистки питьевой воды 309  
перенасыщенная 236  
плотность 146, 153–155, 231  
соленая 155, 236, 303, 304, 306–309  
стационарный поток 159–161  
тяжелая 566, 567
- водонагреватель** 243, 244, 252
- водопроводный кран** 172, 174–177
- водород** 145, 147, 152, 458, 459, 499, 500, 560, 566, 581
- водородная (термоядерная) бомба** 555, 560, 561
- водородная связь** 459, 610, 614, 627, 633
- водопровод** 156, 157, 160–162, 176, 177  
водонапорная башня 162, 163  
водопроводные сети 156, 160–163  
водяной насос 157–160, 162, 163  
гидравлический удар 174, 176, 177  
перепады давления 156, 157, 163, 169, 171, 174
- водяной радиатор** 226
- возвращающая сила** 314
- воздух** 144–151, 169, 178, 179, 223, 328, 329  
абсолютная температура 146  
давление 144–148, 154, 178  
ламинарный воздушный поток 178–180, 184  
нестабильный 299  
плотность 146, 147, 165  
сжатие 144  
скорость 178  
сопротивление 19–21, 27, 29, 44, 178, 209  
спутная струя 178  
температура 145, 146  
турбулентный воздушный поток 180  
циркуляция 179, 295  
частицы 145–147, 150
- воздушный шар** 144, 147–150, 152, 154  
водородный 152  
гелиевый 144, 148, 150, 152, 153  
исследовательский 153  
наполненный горячим воздухом 144, 148, 149  
с вакуумом внутри 149  
эластичный 152
- волны**  
бегущие 328, 331, 335, 336  
впадина волны 328, 335, 336, 338  
гребень волны 328, 335, 336, 338  
длина волны 328, 329, 453, 458  
звуковые 199, 328, 329, 337  
капиллярные 335  
квантовые 423, 424  
механические 323  
микроволны 221, 222, 458–461, 463  
несущие 469  
поперечные 323  
продольные 326, 328  
скорость 328, 337, 338  
стоячие 323, 324, 326, 331, 335, 336  
ударные 199, 200, 280, 562  
частота колебаний 321, 328, 329, 458
- электромагнитные 221, 222, 238, 451, 454, 476, 481
- вольт** 347
- вольт/метр** 356
- вольфрам** 237, 238, 240, 243
- вращательное движение** 46–52, 66, 70, 71, 94, 95, 211
- время** 19, 20, 25, 28, 30, 48, 49, 60, 68–71, 312, 313
- выигрыш в силе** 40, 46, 53–55, 135, 175, 285
- вынужденное излучение** 492, 493
- вулканизация** 610, 612
- газированные напитки** 165, 236
- газоразрядные лампы** 483, 484, 488, 489, 491, 524  
дуговая лампа с галогенидами металлов 525  
дуговая лампа с угольными электродами 524, 525  
люминесцентная 483, 488–490  
металлогалогенная 483, 490, 491  
натриевая 483, 490, 491  
неоновая трубка 389, 485, 488  
ртутная 483, 490, 491  
электрическая 524
- Галилей Галилео** 19, 23, 122, 541
- галогены** 486, 650, 651
- гальванический элемент** 651–654, 660, 661  
гальванический элемент Даниеля 651, 654
- гамма-излучение** 238, 578, 579
- Ган Отто** 555
- гасящая (деструктивная) интерференция** 340, 481, 482
- Гейзенберга принцип неопределенности** 553
- гелий** 144, 145, 147, 150–152, 166, 169, 560, 561, 566, 571
- генри** 452
- германий** 427
- герц** 318
- гидравлические системы** 157
- гидрогенизация** 638
- гидродинамика** 143
- гидротурбина** 213
- гидроэлектроэнергия** 162
- гироскоп** 109, 197  
гироскопическая прецессия 109, 201  
гироскопический эффект 109

- Годдард Роберт** 116, 124
- горизонтальная поляризация** 454, 455
- гравитационная потенциальная энергия** 37, 38, 161
- гравитация** 26, 78, 79, 84, 161  
гравитационная масса 123  
гравитационная постоянная 119  
гравитация и вес тела 78, 84
- грампластинка** 537, 538
- графит** 566, 567, 602, 603
- гроза** 296, 299
- громкоговоритель акустической системы** 447
- громоотвод** 358
- Гудьир Чарлз** 612
- Гака закон** 80, 81, 585
- давление** 145, 147, 151
- Д'Аламбера парадокс** 180
- Даниеля гальванический элемент** 651, 654
- двигатель внешнего сгорания** 291
- двигатель внутреннего сгорания** 276, 278–286, 291  
дизельный 281  
многоцилиндровый 282  
четырёхтактный инжекторный 278, 282
- движение** 19, 20, 23, 38, 69  
баллистическое 29  
вращательное 46–52, 66, 70, 71, 94, 95, 211  
по инерции 18, 20, 23, 32  
поступательное 47, 49–52, 66, 67, 69, 107, 211  
равномерное круговое 100, 102  
с ускорением 20, 21, 23, 29, 100  
тепловое 145, 218  
циклотронное 462, 466, 467, 572
- двоичная система счисления** 435, 436
- двойная связь** 499–500, 620, 637
- действие и противодействие** 34, 116, 206
- дейтерид лития** 561
- дейтерий** 560, 561, 566, 571
- десублимация** 234
- детонация** 280–282, 623
- деформация** 80, 81, 91, 585  
пластическая 586–588  
пружины 80, 81  
сдвига 586, 594  
упругая 81, 82, 586
- Джермер Лестер Хэлберт** 485
- джоуль** 38, 39, 60, 347
- джоуль в секунду** 60
- джоуль на килограмм-кельвин** 223
- дизельное топливо** 281, 619, 625, 629
- динамик** 411, 447
- динамическое равновесие** 109
- диод** 421, 422, 427, 429
- диоксид кремния (кремнезем)** 595–597
- Дирака монополю** 373
- дислокация** 587
- дисперсионное твердение** 589–591
- дисперсия** 337, 340, 479, 480, 535
- дистилляция** 302, 628  
криогенная 630
- дифракция** 532, 533, 545
- дифференциальное исчисление** 29
- диффузия** 152
- диффузор** 209, 213
- дизлектрики** 349, 422, 425–427
- дождь** 234, 296
- домкрат** 135, 136
- Доплера эффект** 329
- Дьюара сосуд** 254
- Дэвиссон Клинтон Джозеф** 485
- Дюфе Шарль Франсуа** 343
- естественная конвекция** 221
- желатин** 616
- железо** 29, 256, 259, 374–376, 413, 584, 586–588, 647  
железная руда 591, 592  
карбид железа 589  
наклев 587  
отжиг 587, 588  
ржавление железа 647, 660  
феррит 586, 589, 590
- Жен Пьер-Жан де** 609
- Жермен Софи** 327
- жидкости** 158, 159, 258, 259, 265  
вязкость 168–170, 594  
замерзание 231  
испарение 232, 233  
кипение 234  
несжимаемость 154, 157
- жирные кислоты** 637
- закон всемирного тяготения** 20, 119, 121, 123
- закон идеального газа** 151
- закон сохранения импульса** 49, 71, 91, 94, 118
- закон сохранения момента импульса** 71, 91, 121
- запрещенная (энергетическая) зона** 425, 426
- звук** 198, 321, 328, 411  
аналоговое представление звука 434, 435  
диапазон частот 321  
звуковые волны 199, 328, 329, 337  
огнибающая звука 325  
превращение колебаний в звук 329  
скорость звука 193, 198, 199, 329, 562  
цифровое представление звука 434, 435  
частота колебаний 321, 328, 329
- Зеебека эффект** 262, 263
- Земля** 26, 27, 32, 79, 84, 119, 120, 127–134, 293, 294, 333, 334, 477  
вращение 79, 85, 297, 333  
магнитное поле 378  
магнитные полюсы 377  
притяжение 26, 27, 32, 38, 79, 84, 85, 119, 120, 147
- золото** 221, 253
- зона проводимости** 426  
уровень проводимости 426–428
- зонная плавка** 307
- зубчато-реечный механизм** 81, 82, 84
- излучение** 220, 221, 248, 249, 562  
вынужденное 492, 493  
излучательная способность 238, 248, 249  
инфракрасное 477  
каналирование излучения 490  
космическое 354  
лазерное 492, 493, 495  
рентгеновское 574, 575, 577  
спонтанное 492  
тепловое 222, 237, 240, 248, 250, 264, 561  
тормозное 574, 575  
ультрафиолетовое 300, 301, 477, 510  
электромагнитное 221, 222, 238, 574
- изображение** 512  
действительное 512–514, 516–518, 520, 540  
мнимое 519, 520, 540
- изомер** 620
- изотоп** 556  
радиоактивный 562, 569, 578
- изумруд** 605
- импульс** 66–75, 115  
закон сохранения импульса 49, 71, 91, 94, 118  
импульс силы 68, 69, 72–74  
релятивистский импульс 122
- инверсия населенности** 494, 495

- инвертор** 440, 441  
КМОП-инвертор 441  
комплементарные (КМОП) элементы 441
- индуктивное сопротивление** 188, 189, 203–205
- индуктивность** 386, 452  
катушка индуктивности 386, 387, 390, 452
- индцированный свет** 492
- инертная масса** 123
- инертные (благородные) газы** 145, 241, 486, 650, 651
- инерция** 18–21, 50, 63, 66, 78  
зрительного восприятия 526  
инерциальная система отсчета 23, 24, 91
- интерференция** 340, 444, 480–482, 485  
гасящая (деструктивная) 340, 481, 482  
интерференционная картина 340  
конструктивная 262, 340, 481, 482
- инфракрасное излучение** 477
- инфракрасный свет** 221, 222, 238, 250, 293, 477
- ионизатор** 361
- конная связь** 596, 600, 633
- нонообменник** 639
- ионы** 346, 361, 552, 634
- Ирншоу теорема** 406
- кабельные сети** 456, 457, 471
- Кавендиш Генри** 119
- кавитация** 207  
кавитационные полости 207
- калибровка** 82
- калория** 60
- калерия в час** 60
- капиллярные волны** 335
- карбокисильная группа** 614, 635, 637
- Карлсон Честер Ф.** 351
- Карезерс Уоллес Хьюм** 614
- карусель** 21, 98–100, 104
- катализатор** 284, 631, 632
- катод** 429, 462, 466
- катушка индуктивности** 386, 387, 389, 452
- качели** 46–55
- квадратный метр** 145, 147
- квант** 427
- квантовая физика** 422–424, 485, 550, 553  
квантовая волиа 423, 424  
квантовое тунелирование 440, 553
- кварц** 318, 319, 595
- Кеплер Иоганн** 120, 128  
первый закон К. 120, 121  
второй закон К. 121  
третий закон К. 121  
телескоп К. 541, 542, 546
- керосин** 220, 625, 629, 647
- килеграмм-метр в квадрате** 50, 52
- килограмм-метр в секунду** 67, 71
- килограмм-метр в квадрате в секунду** 69, 71
- килограмм на кубический метр** 146, 147
- килокалория** 60, 246
- кинетическая энергия** 37, 38, 59–61, 63, 73, 83, 90, 145, 158, 161, 217, 218  
вращательного движения 63, 64  
попутательного движения 63, 64, 151
- кислород** 145, 166, 294, 300, 301, 458, 459, 500, 622
- клей** 614, 616
- клин** 74, 75
- кобальт** 256
- ковалентная связь** 595, 596, 600, 603, 606, 618–620, 633
- ковкость** 588
- когерентный свет** 493
- колебательная энергия** 325
- колебательный контур** 451, 452
- колесо** 57, 61–65, 287–290
- коллимация** 525
- компас** 377–379
- компрессор** 272–275
- комптоновское рассеяние (эффект Комптона)** 575, 577, 578
- компьютер** 416, 417, 440–442, 444–446  
жесткий диск 416, 417, 439, 440
- компьютерная томография** 576, 577
- конвекция** 220, 221, 247, 248, 295  
естественная 221  
конвективная ячейка 221, 295  
конвекционный поток 221  
принудительная 221
- конденсатор** 272–275, 421, 422, 430–432, 443, 452  
емкость 430  
электролит 430, 652
- кондиционер** 268, 271–275
- конечная скорость** 28, 29, 44, 117, 183
- конструктивная интерференция** 262, 340, 481, 482
- контактные линзы** 523, 611
- коррозия** 590, 647
- космическое излучение** 354
- котел**  
газовый 220, 224  
конденсационный 225  
на жидком топливе 224, 225
- Коттрелл Фредерик Гарднер** 360
- коэффициент излучения** 238
- коэффициент лобового сопротивления** 290
- коэффициент объемного расширения** 241, 255, 256, 259, 601
- коэффициент (трения покоя) статического трения** 64
- коэффициент трения скольжения** 64
- коэффициент упругости** 80, 314
- краски** 498–500, 506–508  
алкидные 503  
латексные 499, 503–505  
масляные 499, 501–503  
флуоресцентные 508  
фосфоресцентные 508, 509
- кредитная карта** 376, 377
- кремний** 427, 595, 596
- криогенная дистилляция** 630
- криптон** 145, 241
- кристаллы** 258, 259, 537  
дальний порядок 593  
жидкие 261, 262  
зародышевые 593  
ориентационный лорядок 261  
позиционный порядок 261  
твердые 261
- круговая поляризация** 455
- ксенон** 145
- ксерокс** 351–359
- кубический метр** 24, 146, 147
- Кулон Шарль Огюстен де** 344  
закон К. 344, 345  
закон для магнетизма К. 374  
постоянная К. 345, 451
- кулон** 343, 347
- Кутты условие** 188
- кухонная утварь** 227  
кастрюля 227, 228, 233, 265  
скорсварка 235  
конвекционная печь 229  
микроволновая печь 236, 458–463  
нож 584–586, 588, 590, 591  
плита 227, 228, 243  
духовка 227, 229, 243, 252, 258  
термос 254  
тостер 80, 243, 260
- Кюри Мария** 555
- Кюри Пьер** 555

- Лавала сопло** 114–116
- лавовые (гелевые) лампы** 243, 244
- лазер** 492, 494  
 диодный 496  
 ионно-легированный твердотельный 495  
 лазерное излучение 492, 493, 495  
 лазерный диод 496, 497, 531  
 лазерный луч 359, 492, 494  
 неодимовый АИГ-лазер 495  
 с переменной длиной волны 495, 496  
 титан-сапфировый 495  
 эрбиевый волоконный 496
- лазерный генератор** 493, 494
- лазерный принтер** 359, 360, 494
- ламинарный поток** 171–174
- лампа накаливания** 237–243, 484  
 галогенная 241, 242, 387  
 двухнитевая 241–243  
 долговечная 241  
 криптоновая 241  
 нить накаливания 237–240, 368, 369  
 вольфрамовая 237, 238, 240, 241  
 углеродная 240
- Латимер Льюис Говард** 240
- латунь** 223, 224, 256
- легирующие примеси** 427
- лед** 223, 230–234, 236, 306, 307, 459  
 кристаллическая структура 231  
 плотность 231  
 скользкость 233  
 скрытая теплота плавления 231, 232  
 сублимация 234  
 таяние 231  
 температура плавления 231, 232
- Ленца правило** 386, 394, 407, 408
- летающие кольца (аэробы)** 204–206
- летающие тарелки (фрисби)** 204–206
- линза** 512–519  
 рассеивающая 523  
 собирающая 513, 520, 532  
 уравнение линзы 518
- линии магнитной индукции** 378–380, 387
- лифт** 21, 135–142  
 безопасность 141  
 винтовой 135, 136  
 гидравлический 136, 137, 140  
 с водяным противовесом 139  
 с ручным управлением 142  
 с тросовым приводом 136, 137, 139, 140
- логические элементы** 440, 441, 445  
 инвертор 440, 441  
 логический элемент И 441  
 логический элемент И-НЕ 441
- мультипликатор 442  
 сумматор 442
- Лоренца сила** 401–403, 444, 462, 466, 533
- Луна** 20, 26, 32, 79, 127, 129–133, 178, 334  
 лунное затмение 131  
 обратная сторона Луны 132  
 притяжение Луны 26, 333  
 фазы Луны 131
- лучевая терапия** 575–579
- люмен** 241
- люминесценция** 487
- люминофор** 465–468, 488, 489
- люсит** 613
- магнетизм** 372, 374, 379, 380, 385, 386, 450, 451
- магнит** 372–375, 378, 387  
 магнитный домен 374–376  
 пластиковый 376  
 полюса 372–374, 376, 379, 413  
 диполь 373–375, 405  
 магнитная поляризация 374  
 монополюс 373, 405  
 постоянный 377, 405, 412, 462  
 размагничивание 376  
 составной 377
- магнитное поле** 377–380, 385, 387, 450, 451, 581, 582  
 магнитная индукция 377, 378, 385–387  
 магнитная постоянная 374, 387  
 магнитная сила 372, 380, 405  
 магнитный заряд 374, 378
- магнитно-резонансная томография (МРТ)** 581  
 магнитно-резонансный томограф 582
- магниторезистивная оперативная память** 377
- магнитофон** 411–416
- Магнуса сила** 184
- Магнуса эффект** 184, 185
- мазут** 224, 625
- Маккинтош Чарльз** 611
- Максвелл Джеймс Клерк** 450
- Марс** 127, 128, 130
- мартенсит** 589–591
- масса** 19, 20, 22–27, 32, 35, 38, 50, 51, 63, 67, 69, 78, 84, 85, 90, 115, 119, 123  
 гравитационная 123  
 инертная 123  
 центр масс 49, 50, 52, 69, 71, 83, 111, 117, 201, 202
- математические основы дифференциального и интегрального исчисления** 20, 29
- Маха число** 199
- медь** 221, 223, 228, 253, 256, 259, 383, 651–654
- Мейснера эффект** 384
- Мейтнер Лиза** 555
- Меркурий** 127
- металлическая связь** 587, 600, 603, 633
- металлы** 220, 250, 253, 262, 263, 425, 426, 460  
 актиноиды 486, 650, 651  
 аморфные 597  
 вязкопластичный излом 588  
 лантаноиды 486, 650, 651  
 переходные 486, 650, 651  
 полуметаллы (металлоиды) 486, 650  
 постпереходные 486, 650  
 редкоземельные 651  
 теплопроводность 221  
 термокомпенсированные 468  
 ударная вязкость 588  
 хрупкий излом 587, 588  
 щелочноземельные 486, 650, 651  
 щелочные 486, 650, 651
- металлоискатель** 391
- метамерия** 508
- метан** 145, 294, 627, 630
- метр в секунду** 25
- метр в секунду в квадрате** 25
- механические волны** 323
- микроволны** 221, 222, 458–461, 463
- микроскоп** 539, 546, 547  
 зондовый 548  
 электронный 548
- микрофон** 411, 415, 435
- мицеллы** 636, 637, 641, 648
- моенин** 507
- модуль** 19, 20, 35
- модуль сдвига** 586
- модулятор** 466
- молоток** 74, 75
- момент импульса** 66, 69–72, 109  
 закон сохранения момента импульса 71, 91, 121
- момент импульса силы** 70–72
- момент инерции** 48–52, 63, 66, 69, 71
- момент силы** 49–54, 62, 70, 71, 211  
 результирующий момент силы 53, 54
- моторное масло** 168, 626
- мощность** 59, 60, 364, 368

**музыкальные инструменты** 321–332

барабан 327, 329  
 кларнет 327  
 ксилофон 93  
 литавры 327, 328  
 музыкальная шкатулка 331, 332  
 орган 325–327  
 скрипка 322–325, 330  
 флейта 327

**мыло** 634–640, 646**мяч** 26–32, 37, 50, 88–97, 178–182, 185

баскетбольный 50, 90, 97  
 бейсбольный 32, 60, 89, 91, 92, 182–184  
 мяч для гольфа 26, 31, 72, 89, 97, 181, 182, 185  
 мяч для регби 88, 97, 183  
 подкрутка 95, 97  
 соударение 89–93, 96  
 теннисный 88–90, 97, 182  
 футбольный 22, 97

**направление** 19–21, 35, 38, 68–71**напряжение** 585

напряжение сдвига 586, 594  
 растягивающее 585  
 сжимающее 585

**насос**

водяной 157–160, 162, 163  
 ротационный 274  
 тепловой 268, 271–273, 275

**наушники** 435, 444**невесомость** 84, 101, 102, 120**негашеная известь** 592**нейтрине** 578, 579**нейтрон** 343, 375, 552, 554–557, 560,

565, 571  
 быстрый 566, 568  
 запаздывающий 565  
 медленный 566, 568

**нейтронная бомба** 561**некогерентный свет** 493**неметаллы** 221, 486, 650**кеньютоновские жидкости** 169**неон** 145, 485**неоновые вывески** 389, 488**Нептун** 130**несущая волна** 469**неустойчивое равновесие** 107, 108**нефтепереработка** 618

гидроочистка 622  
 изомеризация 632  
 каталитический крекинг 630, 631  
 реакция полимеризации 632  
 риформинг 632  
 термический крекинг 630, 631

**нефтепродукты** 618, 622–627, 629, 632**нефть** 170, 618–622, 624, 626–630**никель** 256, 590, 661**нитрид бора** 603**нитроцеллюлоза** 606, 613**нихром** 243

нихромовые спирали 243

**нормаль** 35**нормальные силы** 35**нуклон** 552–554**Ньютон Исаак** 20, 23, 25, 26, 118, 121–123,

127, 128, 169  
 первый закон Н. 20, 23, 47, 49, 52, 71, 99  
 второй закон Н. 20, 22, 25, 51, 121  
 третий закон Н. 20, 34, 36, 58, 68, 70, 114, 157, 188, 345, 374  
 закон всемирного тяготения Н. 20, 119, 121, 123  
 “Математические начала натуральной философии” 20  
 математические основы дифференциального и интегрального исчисления Н. 20, 29

**ньютон** 25, 26**ньютон/кулон** 355**ньютен-метр** 38, 39, 50, 52, 60**ободненный слой** 428, 429**обогреватель** 220, 243, 260**обратная связь** 405–407**объем** 24, 50, 146, 147, 161**объемная концентрация частиц**

150, 151

**озон** 300, 301, 361**окно** 253, 593, 599

низкоэмиссионное 253, 254  
 стеклопакет 253, 254

**оксид индия-олова** 253**оксид кальция** 597**оксид натрия** 596**октановое число** 624, 625, 631, 632**олефин** 618, 620, 621, 624**олифа** 499, 500**олово** 256, 599, 600**Ом Георг Симон** 370

закон Ома 368, 370, 383  
 омические системы 370

**ом** 370, 437**оперативное запоминающее устрой-**

ство 439

**опорные катки** 61, 62**оптическая запись звука**

аналоговая 528  
 цифровая 528

**оптическое волокно** 533

многомодовое 534, 535  
 одномодовое 535  
 со смещенной дисперсией 535  
 эрбиевые волоконные усилители 536

**орбита** 118, 119, 128–130

гиперболическая 119, 120  
 круговая 119, 120  
 орбитальный период 119, 121, 128  
 эллиптическая 119–121, 128, 129

**органические соединения** 602**оружие**

винтовка 183  
 пистолет 280  
 пистолет с глушителем 280  
 пуля 32, 183, 280  
 винтовочная 183  
 с дозвуковой скоростью 280  
 сверхзвуковая 280

**осмос** 307, 308

обратный осмос 307, 308

**осциллятор** 314, 315, 323, 331, 335, 452

гармонический 82, 313–318, 322, 325, 454  
 кварцевый 318  
 колебательный контур 451, 452  
 негармонический 316

**ось вращения** 46–52**Отис Элиша Грейвз** 135, 137, 141**отклоняющая сила** 184, 185**относительная влажность** 233, 234,

296, 302

**отопительные системы** 225

гравитационного водяного отопления 226  
 гравитационного воздушного отопления 225  
 коллекторно-лучевая 226  
 с принудительной циркуляцией 225

**отражение** 339, 340, 479, 482

избирательное 262  
 полное внутреннее 533, 534, 604

**Отто Николаус Август** 278**пандус** 33, 37–40, 42, 174, 175**пар** 223, 230–236

десублимация 234  
 конденсация 232, 233  
 насыщенный 235, 302  
 скрытая теплота испарения 233, 304

**парафин** 606, 607, 618, 620, 621, 624**парашют** 183**парниковый эффект** 293, 294



- паровая машина** 291
- паровое отопление** 226
- паровой радиатор** 226
- паскаль** 145, 147, 585
- паскаль-секунда** 169, 594, 599
- Паскаля закон** 136, 157, 158
- Паули Вольфганг** 423
- перегрузка** 98–103
- перемещение** 19, 30–32, 37, 40, 58, 61
- перенасыщенный раствор** 590
- переохлаждение** 248, 593
- Перкин Уильям Генри** 507
- перлит** 589
- Пифагор** 322
- плавание** 153–155, 206, 207  
выталкивающая сила 148–150, 153, 201, 203  
плавучесть 148, 153, 154  
сила сопротивления давления 204, 206
- плавательные средства** 155  
глиссер 203  
гоночный катер 203  
катер на подводных крыльях 203  
корабль 202, 203  
моторный катер 199, 200, 207  
парусная яхта 203, 204  
подводная лодка 154, 201, 202, 207  
центр плавучести 202
- плазменная частота** 253
- Планка постоянная** 487, 488
- пластиковая бутылка** 153, 157, 611
- пластиковые магниты** 376
- пластическая деформация** 586–588
- платина** 240, 284
- плато высокой эластичности** 608, 612
- плексиглас** 608, 613–615
- плечо силы** 52–54, 83
- плотность** 146, 147, 149
- площадь** 145, 147  
площадь опоры 108, 111
- Плутон** 130
- плутоний** 556, 558–560, 562, 568
- поверхностно-активные вещества (ПАВ)** 504, 636, 641  
катионные поверхностно-активные вещества 644–645
- поверхностное натяжение** 335, 587, 627, 628, 635, 636
- подъемная сила** 148, 149, 151, 178, 185–190, 192, 201, 203–205, 290
- поезд на магнитной подушке** 404–410  
магнитная подвеска 404  
магнитное торможение 409  
подвеска с переменным током 407  
предел скорости 404  
устойчивость 405–407  
электродинамическая подвеска 408, 409
- позитрон** 578
- полевой транзистор** 437, 438
- полиен** 620
- полимеризация** 500, 610, 615, 616
- полимеразная цепная реакция** 612
- полимеры** 498, 501–504, 606, 608–610  
гомополимер 610  
дезоксирибонуклеиновая кислота (ДНК) 612  
жидкокристаллические 615  
каучук  
вулканизированная резина 612  
натуральный 610–612  
силоксановый 612  
синтетический 612, 614  
метилметакрилат 615, 616  
полиметилметакрилат (плексиглас) 608, 613–615  
метилцианоакрилат 614  
нейлон 613, 614  
полиметилцианоакрилат 614  
пластификатор 609  
поливинилацетат 608  
поливинилхлорид (винил) 609  
полидиметилсилоксан 609, 612  
полиметилакрилат 614  
полипарафенилентерефаламид (кевлар) 615  
политетрафторэтилен (ПТФЭ, тефлон) 613–615  
полиэтилен 608, 609  
высокого давления (ПЭВД) 607–610  
низкого давления (ПЭНД) 606, 607, 610  
растительная камедь 609  
реактопласты 610, 612  
репация 609  
синтетические 613  
сополимер 610  
термопласты 610, 612  
целлюлоза 219, 507, 609–611, 613  
ацетилцеллюлоза (ацетат) 613  
целлулоид (нитроцеллюлоза) 606, 613
- Полинг Лайнус** 651
- полоний** 555
- полупроводники** 263, 422, 423, 425, 427  
п-типа 427, 428  
р-типа 427, 428
- Поляков Александр** 373
- поляризация** 458  
вертикальная 453, 455  
горизонтальная 454, 455  
круговая 455  
магнитная 374  
электрическая 345
- поперечная волна** 323
- постоянная скорость** 20, 23, 40
- постоянный магнит** 377, 405, 412, 462
- поступательное движение** 47, 49–52, 66, 67, 69, 107, 211
- потенциальная энергия** 37, 38, 59–61, 72, 73, 82, 83, 107, 108, 145  
гравитационная 37, 38, 161  
давления 158, 159, 161  
обусловленная силами тяготения 60, 82  
обусловленная упругостью 60  
упругой деформации 81, 82  
химическая 38, 40, 60, 217, 346, 649  
электростатическая 60, 347, 356  
ядерная 60, 554
- потолок полета** 150, 154, 189
- Поульсен Вальдемар** 412
- правило правой руки** 48, 49, 53
- правило штопора (буравчика)** 48
- Прандтль Людвиг** 180, 181
- прецессия** 127, 133, 205
- приливы и отливы** 26, 131, 333, 334  
волна 336  
бегущая поверхностная 335, 336  
гравитационная 335  
прибрежная 338  
стоячая поверхностная 335, 336  
гигантские 334, 335  
квадратурные 334  
приливные горбы 333, 334  
приливные силы 130, 333, 334  
сейши 335  
сигизийные 334  
цунами 338
- принудительная конвекция** 221
- принцип запрета Паули** 423, 424, 493, 509, 618, 620, 625, 650
- принцип корпускулярно-волнового дуализма** 422
- принцип эквивалентности** 123
- проводники** 355, 356, 358, 422
- продольная волна** 326, 328
- проектор** 524  
видеопроектор 527  
витаскоп 526  
графопроектор 525  
диапроектор 525  
кинетоскоп 526  
кинопроектор 525

- препан** 627, 630
- протон** 343, 344, 375, 552, 554, 560, 581, 582
- пружина** 78–82, 84, 316, 317  
жесткая 80, 82  
мягкая 80  
предел упругости 81  
растянутая 79, 81  
спиральная 81
- Птоломей** 127, 133
- Пуазейля закон** 170, 176
- пульсар** 313
- пылесос** 208–213
- пьезоэлектрические материалы**  
319, 447
- работа** 36–38, 40–43, 59–61, 72, 81, 211, 269  
отрицательная 37, 38, 41, 61  
положительная 37, 41  
при вращательном движении 211
- равновесие** 52, 79, 80–83  
вращения 108, 110  
динамическое 109  
неустойчивое 107, 108  
нулевая результирующая сила 35, 39, 78, 79, 106  
равновесная форма 80, 88  
тепловое 218, 269  
устойчивое 81, 82, 106–108  
химическое 652, 653
- радиан** 48, 52, 211
- радиан в секунду** 48, 51, 52
- радиан в секунду в квадрате** 52
- радий** 555
- радио** 450, 453  
амплитудная модуляция (AM) 455, 456  
антенна 451–457  
магнитная 455  
передатчик 452, 453  
полосы пропускания 456  
приемник 451–453, 456  
монофонический 456  
стереофонический 456  
радиоволны 221, 222, 238, 450, 451, 453, 455–457  
частота 451, 453  
несущая 456  
частотная модуляция (FM) 455, 456
- радиоактивность** 354, 562
- радиоактивный распад** 551, 553, 554  
альфа-распад 556  
бета-распад 555, 578, 579  
период полураспада 553  
экспоненциальный 553
- радиус-вектор** 19, 22, 23, 25, 28, 30, 31
- радуга** 478, 480
- радиодиагностика** 575
- радиоуглеродный анализ** 562, 563
- размагничивание** 376
- разрешенная (энергетическая) зона** 425, 426
- Райт Ориэл** 192, 193, 196
- Райт Уилбур** 192, 193, 196
- ракета** 114–125  
движение по орбите 118  
ионный двигатель 125  
Конгрива 124  
многоразового использования 118  
на жидком топливе 116, 124, 125  
жидкостный ракетный двигатель 115, 124  
самовоспламеняющееся жидкое топливо 125  
на твердом топливе 124  
твердотопливный ракетный двигатель 124  
период обращения по орбите 119  
реактивная газовая струя 115–118  
реактивный двигатель 114  
солнечный парус 125, 126  
стабилизация 116, 117  
"Фау-2" 124  
Хейла 124
- распределенная система** 323, 326, 327
- расстояние** 19, 20, 25, 37, 38, 40, 50, 119  
равновесное межатомное расстояние 217, 218, 241
- реактивная сила** 114–117
- Резерфорд Эрнест** 555
- резистор** 436–438
- резонансная вибрация** 325
- резонансный перенос энергии** 325, 326, 334, 335, 454
- результирующая сила** 35, 36, 39, 40, 42, 59, 72  
нулевая 35, 39, 78, 79, 106
- Рейнольдса число** 173, 180–182, 209, 210
- релятивистская энергия** 122, 123
- релятивистский импульс** 122
- Рентген Вильгельм Конрад** 573
- рентгеновские лучи** 573–577  
образование электронно-позитронных пар 575, 578  
рентгеновская флуоресценция 574  
рентгеновский фотон 574–577  
рентгеновское изображение 575–577  
упругое рассеяние 575, 576
- рафракция** 338
- Роже Питер Марк** 526
- роликовый подшипник** 62, 63
- Рорер Генрих** 548
- ротационный насос** 274
- ртуть** 125, 256, 488
- рубин** 605
- рычаг** 46, 50, 54–56, 85
- рэлеевское рассеяние** 478, 482
- самолет** 21, 186–199  
высокоскоростной 193  
гиперзвуковой (ПВРД) 195  
двигатель  
прямоточный воздушно-реактивный (ПВРД) 195  
реактивный 114, 192, 193  
турбовентиляторный 194, 195  
турбореактивный 193–196  
крылья 186, 187, 189–192, 195, 196  
обтекаемость 186–188  
рассеиватели статического электричества 195, 358  
маневрирование 196  
навигация 196–198  
реактивный 189, 196  
сверхзвуковой 199, 200  
стабилизация 195  
"тошнيلовки" 102  
управление 195–198
- сапфир** 605
- Сатурн** 127, 130
- сверхпроводники** 384, 410
- сверхпроводящие электромагниты** 410
- свет** 237, 320, 351, 422, 483, 485  
видимый 221, 222, 237, 238, 250, 293, 300, 476  
индуцированный 492  
инфракрасный 221, 222, 238, 250, 293, 477  
когерентный 493  
некогерентный 493  
преломление 479, 480  
показатель преломления 478, 502  
световой поток 241  
скорость 122, 123, 458, 477  
спонтанный 492  
ультрафиолетовый 221, 222, 238, 293, 510  
цветовая температура 239  
черные тела и свет 222
- светодиод** 492, 496, 497, 522
- свинец** 29, 161, 223, 256
- свинцовый аккумулятор** 654–656
- свободное тело** 23
- свободный радикал** 500

- CD/DVD-плеер** 434, 436, 438–442, 444, 534, 533, 536  
оптическая система 531
- CD/DVD-диск** 528–530, 532
- сера** 612, 622, 640
- серебро** 221, 228, 253, 256, 383
- сила** 18–23, 25, 26, 34, 37, 38, 40, 51–53, 68, 69  
аэродинамическая 117, 124, 178, 180, 188, 203–205  
Ван-дер-Ваальса 504, 607, 623, 625, 633  
возвращающая 314  
вязкого трения 168, 180  
Кориолиса 297–299  
лобового сопротивления 178  
Лсренца 401–403, 444, 462, 466, 533  
Магнуса 184  
нормальная 35  
отклоняющая 184, 185  
подъемная 148, 149, 151, 178, 185–190, 192, 201, 203–205, 290  
притяжения 26, 27, 37, 119  
реактивная 114–117  
реакции опоры 35, 39, 40, 42, 46, 47, 58, 78, 100  
результатирующая 35, 36, 39, 40, 42, 59, 72  
сцепления 59, 64  
трения 43, 44, 58, 59, 61, 64, 100  
трения покоя 59, 61, 64  
трения скольжения 59, 61  
тяжести 29, 31, 38, 39, 42, 72, 160  
упругости 80, 81, 322  
уравновешенные силы 36  
центростремительная 100, 104  
электродвижущая сила индукции 386  
электростатическая 343–345, 347, 354, 360, 649  
ядерная 552, 553
- система GPS** 198
- система единиц СИ** 24, 25
- сифон** 161
- скорость** 18–25, 27–31, 37, 44, 51, 63, 67, 69, 72, 90, 100, 115  
воздуха 178  
волны 328, 337, 338  
звука 193, 198, 199, 329, 562  
истечения реактивной газовой струи 116, 118, 125  
конечная 28, 29, 44, 117, 183  
освобождения (вторая космическая скорость) 120  
постоянная 20, 23, 40  
равновесная 155  
света 122, 123, 458, 477  
угловая 48–52, 63, 69, 71, 100
- скрипка** 322–325, 330
- смазочные вещества** 625, 626
- Солнце** 26, 120, 121, 127–134, 248, 293, 334, 476, 477  
восход 478  
загар 300, 477, 488  
закат 478  
ожог 300, 477, 488  
орбита 120  
притяжение Солнца 26, 130, 333  
солнечное затмение 131  
солнечный ветер 134  
солнечный свет 237, 476–482, 484  
фотосфера 476, 477  
электромагнитные волны солнечного света 476
- сопротивление** 58  
воздуха 19–21, 27, 29, 44, 178, 209  
вязкое 180, 187, 203, 204, 207, 209, 210  
давления 180, 181, 204, 206  
индуктивное 188, 189, 203–205  
лобовое 178, 192  
электрическое 363, 369, 383, 437
- составной магнит** 377
- соударение** 89–93  
неупругое 93  
упругое 93, 96
- спектр абсолютно черного тела** 239
- Спенсер Перси Лебарон** 458
- спирт** 256, 305, 306, 505
- спичка** 218
- спонтанное излучение** 492
- спонтанный свет** 492
- спортивные тренажеры** 40  
беговая дорожка 42, 43  
велотренажер 41  
гребной тренажер 42  
свободный вес 40, 41  
степпер 41, 42  
эллиптический тренажер 42
- спутная струя** 178
- спутник** 119, 198  
геоинхронный 119  
геостационарный 119  
метеоспутник 119  
телекоммуникационный 50, 119
- сталь** 374–376, 584–586, 588–592  
аустенитная нержавеющая 590, 591  
дисперсионно-твердеющая 590, 591  
закалка 590  
кислородно-конвертерный процесс 592  
кокс 592  
легирующая 590  
мартеновский процесс 592  
нагартованная 592  
нержавеющая 221, 228, 256, 590, 591  
охлаждение 589, 590  
предел текучести 586, 587
- углеродистая 590  
чугунный 591, 592
- статическое электричество** 342, 343, 351  
перенос электрического заряда 345, 346  
статическое притяжение 344  
управление статическим электричеством 349  
электростатические силы 343–345, 354, 360, 649  
электростатический потенциал 347, 356
- стекло** 221, 223, 256, 593–595, 599, 601  
алюмосиликатное 598, 600  
боросиликатное 597, 598, 601  
вязкость 169, 594  
горячее 600  
двустороннее 494  
закаленное 601, 602  
известково-натриево 596–598, 601  
кварцевое 265, 595–597  
маатовое (молочное) 598–599  
натриево-свинцовое 598  
оптическое 598, 600  
пуленепробиваемое 602  
расстеклование 595, 597  
стеклокерамика 265, 599  
температура стеклования 594, 595, 600  
термополированное 599, 600  
термостойкое 265  
флот-процесс 599, 600  
хрусталь (свинцовое стекло) 598
- стекловолокно** 251, 252, 600
- стеклообразное состояние** 594, 595, 597
- стереомагнитофон** 414, 415
- Стефана — Больцмана закон** 240, 248
- Стефана — Больцмана постоянная** 151, 224, 240
- стиральная машина** 104, 343, 647
- стирка** 634–636, 638–644, 646, 647  
жесткая вода 638  
отбеливатель 634, 642–644  
средства для стирки 634, 639, 641, 644–646  
умягчение воды 638, 639  
фермент 642–644
- стоячая волна** 323, 324, 326, 331, 335, 336
- структурный фазовый переход** 589
- субатомные (фермионовские) частицы** 423, 424, 493, 579
- сублимация** 234
- субтрактивная система цветов** 359, 484, 607
- суперпозиция (наложение)** 324
- суспензия** 504

- твердое аморфное вещество** 593, 594
- телевидение** 464, 471–474
- телевизор** 465, 467, 468, 471  
аналоговый видеосигнал 468, 470  
кинескоп 465–467  
цветной 466, 467  
черно-белый 465, 466  
композитный видеосигнал 468
- телескоп** 539, 541, 545  
визуальный 539, 540  
Галилея 541  
Кассегрена 544, 545  
Кеплера 541, 542, 546  
космический телескоп “Хаббл” 546  
Ньютона 544, 545  
отражающий 541–544, 547  
радиотелескоп 547  
фотографический 539
- температура** 59, 218, 222, 237  
абсолютная 146, 151, 224  
абсолютный нуль 146, 219, 271, 272  
воздуха 145, 146  
земной поверхности 293  
кипения воды 219, 235, 236  
плавления льда 231, 232  
солнечной поверхности 237, 239, 248, 293  
стеклования 594, 595, 600  
температурная шкала 218  
Кельвина 146, 218, 219, 248  
Фаренгейта 146, 218, 219  
Цельсия 146, 218, 219  
цветовая 239
- тензодатчик** 84
- тепловая энергия** 38, 41, 42, 59–61, 63, 81, 145, 216–220, 222, 268–270, 276
- тепловизор** 264
- тепловое движение** 145, 218
- тепловое излучение** 222, 237, 240, 248, 250, 264, 561
- тепловое равновесие** 218, 269
- тепловое расширение** 258, 265  
жидкостей 258  
твердых тел 258
- тепловой насос** 268, 271–273, 275
- теплоемкость** 223  
воды 224, 231  
воздуха 224  
удельная теплоемкость 223
- теплоизоляция** 245, 248, 253, 254  
алюминиевая фольга 250  
здания 251–253  
зеркальные, белые и прозрачные поверхности 249, 250  
золотая фольга 250  
металлизированные ткани 249, 250
- теплообмен** 220, 246, 250  
противоточный 247, 252
- теплообменник** 220, 273, 274
- теплоотдача** 246
- теплопроводность** 220, 221, 246–248
- термодинамика** 268, 270  
нулевой закон термодинамики 269  
первый закон термодинамики 269, 278, 279, 291  
второй закон термодинамики 269–272, 276, 277, 280, 291, 292, 295, 304, 309  
третий закон термодинамики 271  
термодинамические процессы 654
- термометр** 255  
Галилея 256  
кулинарный 259  
металлический 258, 259  
на полимерной пластине 261, 262  
оптический 264  
ртутный 256, 257  
спиртовой 256  
стеклянный 255–257  
термометр холодильника 259  
циферблатный 259  
электронный 262, 263
- термопара** 262, 263
- терморезистор** 262, 263
- термостат** 226, 255, 257, 258, 260  
жидкостный 255  
ртутный выключатель 260  
с биметаллическими пластинами 260  
электронный 262
- термоэлектронная эмиссия** 446
- термоядерная реакция** 554
- термоядерный синтез** 554, 561, 571  
инерционный 571, 572
- Тесла Никола** 385
- тесла** 378
- тофлон** 613–615
- титан** 93, 256
- токамак** 572
- Томпсон Бенджамин** 218
- торий** 554
- тормоз** 63, 64, 289, 290  
антиблокировочная тормозная система (АБС) 65, 289, 290  
барабанный 289  
дисковый 113, 289  
задний 113  
клевшейвой 112, 113
- тормозное излучение** 574, 575
- транзистор** 434, 436–438
- трансформатор** 385–388, 390–393, 421, 432  
изолирующий 389  
повышающий 389, 391  
понижающий 389, 391, 392, 431, 432
- гранне** 18–21, 43, 44, 57–60, 81  
вязкое 168, 169, 180, 209, 210  
качения 97  
покоя 59, 61, 62, 104  
скольжения 59, 61, 62
- третий** 560, 561, 571
- тройная точка воды** 219, 303
- троостит** 589
- турбулентность** 172, 174, 180  
бабочка и турбулентность 177  
зона турбулентности 174, 195  
турбулентный пограничный слой 181, 182  
турбулентный поток 173, 174, 177  
вихревое течение 173
- Уатт Джеймс** 291
- углеводород** 219, 220, 614, 618, 619, 623–625, 628  
ароматические углеводороды 618, 621, 622, 624, 626  
продукты реакции горения углеводородов 219  
углеводородная цепь 607, 635
- углеводы** 300
- углекислый газ** 145, 165, 219, 225, 236, 294, 300
- углерод** 240, 499, 500, 566, 588, 602, 603, 618–620, 622  
монооксид углерода 225  
углеродная цепь 619–621
- углевая координата, см. угловое перемещение**
- угловая скорость** 48–52, 63, 69, 71, 100  
постоянная 49
- угловое перемещение** 48, 51, 52
- угловое ускорение** 50–52, 108
- угол наклона** 42
- угол поворота** 48, 211
- ударная волна** 199, 200, 280, 562
- ультрафиолетовое излучение** 300, 301, 477, 510
- ультрафиолетовый свет** 221, 222, 238, 293, 510
- Уоттс Уильям** 29
- упорядоченная энергия** 270, 276
- упругая деформация** 81, 82, 586
- упругость** 80  
коэффициент 80  
предел 81  
сила 80, 81, 322

- уравновешенные силы** 36
- ураган** 296–299
- Уран** 130
- уран** 60, 104, 554–558, 562, 564, 566–570  
обогащение 566
- усилитель звука** 442–444
- ускорение** 19–23, 25, 26, 28, 30–32, 35, 36, 38–40, 43, 44, 51, 72, 73, 79, 83, 98–103  
свободного падения 26–29, 32, 38, 39, 43, 100, 101  
угловое 50–52, 108  
центростремительное 100, 104, 121
- ускоритель частиц** 579  
линейный 579–581
- устойчивое равновесие** 81, 82, 106–108
- устойчивость** 106, 195  
вращательная статическая 106, 107  
динамическая 108, 109  
динамическая вращательная 116, 124  
линейная статическая 106  
статическая 106–109
- фазовое равновесие** 232, 235, 274, 302, 303
- фазовые проворачивания** 233, 234, 274
- Фалес Милетский** 342
- фарад** 430
- Фарадей Майкл** 385
- фан для сушки волос** 213, 243
- фармент** 642–644  
протеолитические ферменты 643
- Ферми Энрико** 555, 566  
море Ф. 424  
уровень Ф. 424–426  
энергия Ф. 424
- ферромагнетики** 374, 412
- форрит** 586, 589, 590
- ферромагнетизм** 375  
ферромагнетики 374, 375, 412
- флуоресценция** 489, 508
- флюиды** 143, 148, 149, 155, 156, 173  
вязкость 168, 169, 173, 178, 180  
несжимаемость 154, 157  
текучесть 148, 165, 230, 259
- фосфор** 218, 465
- фосфоресценция** 509
- фотоаппарат** 512, 514, 519  
объектив 512–520  
окуляр 520, 521
- фотодюд** 522, 533
- фотон** 126, 300, 304, 427, 487, 489, 494, 574
- фотопроводник** 426, 427
- фотосинтез** 300
- фотосфера** 476, 477
- фотоэмиссия** 576
- фотоэффект** 575–577
- Франклин Бенджамин** 343, 344, 364
- фундаментальные взаимодействия** 579  
гравитационное 26, 579  
сильное 579  
слабое 579  
электромагнитное 579
- Хайатт Джон** 606, 613
- Хайатт Исая** 606, 613
- Хилл Джулиан** 614
- химическая потенциальная энергия** 38, 40, 60, 217, 346, 649
- химическая связь** 145, 217, 218, 633
- химическое равновесие** 652, 653
- химистка** 647, 648
- хлорид натрия** 303
- хлорофилл** 300
- хлорфторуглероды** 275
- хлорфторуглероды** 301
- холодильник** 252, 275, 374
- Хоофт Герард** 373
- хромофор** 642, 643
- Хэнкон Томас** 611
- цветовая температура** 239
- центр давления** 183
- центр масс** 49, 50, 52, 69, 71, 83, 111, 117, 201, 202
- центр тяжести** 83, 86, 108, 202
- центрифуга** 104  
аттракцион 104  
газовая 104  
ультрацентрифуга 104
- центростремительная сила** 100, 104
- центростремительное ускорение** 100, 104, 121
- цетан** 625
- циклон** 298, 299
- циклопарафин** 618, 619, 621, 626
- циклотронное движение** 462, 466, 467, 572
- циник** 256, 651–654
- Циолковский Константин** 118, 124
- циркуляция воздуха** 179, 295
- цифровая камера** 512
- цифровая память** 438  
динамическая 439, 440  
жесткий магнитный диск 416, 417, 439, 440  
оперативная 439  
оперативное запоминающее устройство 439  
оптический накопитель 439  
флеш-память 439, 440
- частота** 318, 321, 451
- часы** 312–320  
астрономические 320  
атомные 320  
кварцевые 318, 320  
наручные 316, 317, 319  
песочные 313  
портативные механические 317  
с балансиром 316–318  
с маятником 314–316, 318  
электронные 318, 320
- Чедвик Джеймс** 555
- черные дыры** 123
- чугун** 228, 584, 592
- шарикоподшипник** 62, 63  
шарик подшипника 62, 63, 89
- Шеннона предел** 474
- шина** 97  
автомобильная 288–290  
волосипедная 113
- шкала электроотрицательности Полинга** 651
- шланг** 168–172, 174
- Шоули Уильям** 437
- Штаудингер Герман** 606
- эвтектическая смесь** 596
- Эдисон Томас** 240, 383–385, 526, 537
- Эйнштейн Альберт** 122, 492  
общая теория относительности 123, 550  
специальная теория относительности 122, 123, 580  
принцип эквивалентности Э. 123  
уравнение Э. 551
- Эйфель Гюстав** 180, 181
- эквивалентность массы и энергии** 551
- эластомер** 176, 612
- электрическая поляризация** 345
- электрическая розетка** 384, 385

- электрическая цепь** 362  
замкнутая 363  
короткая 363  
короткое замыкание 363  
падение напряжения 368  
параллельное соединение 441, 442  
последовательное соединение 441  
разомкнутая 363  
увеличение напряжения 368
- электрические проводники** 349
- электрический генератор** 213,  
393–396, 399, 400  
дизельный 383  
угольный 383
- электрический дверной звонок**  
379, 380
- электрический двигатель** 393, 396, 400  
асинхронный 401–403  
бесщеточный постоянного тока 397–400  
линейный 405, 410  
постоянного тока 397  
синхронный переменного тока 396  
универсальный 400, 401  
щеточный постоянного тока 398–400
- электрический ток** 362–364, 380  
переменный 384–386  
высокой частоты 432  
энергия переменного тока 420  
постоянный 383–385  
пульсирующий 431  
стабильный 431  
энергия постоянного тока 420  
сила тока 364, 368, 370  
электрический шок 383  
электрическое сопротивление 363, 369,  
383, 437
- электрически нейтральные тела** 345
- электрический фонарик** 362–366, 368
- электрическое поле** 354–356, 385,  
450, 451  
градиент потенциала 355, 356  
напряженность 355, 356  
разность потенциалов 346, 347
- электричество** 342–349, 362, 374, 379,  
380, 382, 385, 386, 450, 451, 649  
индукционная зарядка 358, 359  
коронный разряд 354, 356, 358, 360  
напряжение 364, 368, 370  
огни святого Эльма 358  
электрический заряд 342–347, 355, 356,  
362, 380  
дискретность 344  
отрицательный 343  
положительный 343  
суммарный 343, 346  
элементарный 344
- электродвижущая сила индукции** 386
- электролиз воды** 657
- электролит** 430, 652
- электромагнитная индукция** 387, 407
- электромагнитное излучение** 221, 222,  
238, 574  
длина волн 238  
спектр 238
- электромагнитные эффекты** 444
- электромагниты** 379–381, 406  
сверхпроводящие 410
- электрон** 220, 343, 344, 346, 375, 422, 424,  
462, 466, 487, 552, 649, 650, 651  
в твердых веществах 423–425  
электронная волна 423  
электронный пучок 466, 467
- электронавольт** 496, 575
- электронные очистители воздуха**  
360, 361
- электроотрицательность** 651
- электропроводность** 350
- электростанция** 391
- электростатическая потенциальная энергия** 60, 347, 356
- электроэнергия** 382, 564  
передача 383, 391  
распределение 382–384, 391
- элементарные частицы** 343, 344
- эмульгатор** 637, 646, 647
- эмульсия** 504, 628, 637
- энергия** 36–42, 59–61, 66, 71, 72  
активации 218, 219  
ветра 213, 295  
внутренняя 59, 269  
воды 159, 160, 171, 213  
кинетическая 37, 38, 59–61, 63, 73, 83, 90,  
145, 158, 161, 217, 218  
вращательного движения 63, 64  
поступательного движения 63, 64, 151  
колебательная 325  
переменного тока 420  
покоя 123  
постоянного тока 420  
потенциальная 37, 38, 59–61, 72, 73, 82, 83,  
107, 108, 145  
гравитационная 37, 38, 161  
давления 158, 159, 161  
обусловленная силами тяготения 60, 82  
обусловленная упругостью 60  
упругой деформации 81, 82  
химическая 38, 40, 60, 217, 346, 649  
электростатическая 60, 347, 356  
ядерная 60, 554  
релятивистская 122, 123
- тепловая 38, 41, 42, 59–61, 63, 81, 145,  
216–220, 222, 268–270, 276  
упорядоченная 270, 276  
упорядоченных процессов 59  
Ферми 424  
химическая 38  
ядерная энергия 60, 562
- энтропия** 269–272
- этан** 630
- этиловый спирт** 303
- Эрстед Ханс Христиан** 380
- эрстед** 413
- Юнга модуль** 585, 586
- Юпитер** 127, 130
- ядерная потенциальная энергия**  
60, 554
- ядерная сила** 552, 553
- ядерное оружие** 550, 551, 556, 561, 569  
атомная бомба 550, 551, 555, 560, 564, 566  
водородная (термоядерная) бомба 555,  
560, 561  
грибовидное облако 562  
грязная бомба 562  
критическая масса 557, 560, 564  
направленный внутрь взрыв 559, 560  
нейтронная бомба 561  
проникающая радиация 561  
радиоактивные ядра 562  
сверхкритическая масса 557, 560  
ядерная цепная реакция 555–558
- ядерный реактор** 558, 562, 564  
безопасность 569  
водо-водяной 567, 568  
замедлитель нейтронов 566  
на быстрых нейтронах 568, 569  
на медленных нейтронах 568, 569  
на тепловых нейтронах 565–567  
радиоактивные отходы 569, 571  
система аварийного охлаждения 569  
термоядерного синтеза 570–572  
ядерного деления 564, 565, 570  
ядерное топливо 565

ЛУИС А. БЛУМФИЛД

# КАК ВСЁ РАБОТАЕТ

*Законы физики в нашей жизни*

*Главный редактор* ВАРВАРА ГОРНОСТАЕВА

*Художник* АНДРЕЙ БОНДАРЕНКО

*Научные редакторы* АНДРЕЙ БАРАМОВ, СЕРГЕЙ ПАРНОВСКИЙ

*Ведущий редактор* ЕВГЕНИЯ ЛАВУТ

*Редакторы* ЕВГЕНИЯ ЛАВУТ, АЛЕКСАНДР ТУРОВ

*Научные консультанты* СЕРГЕЙ РЫКОВ (Политехнический музей), ДМИТРИЙ БАЮК

*Ответственный за выпуск* ОЛЬГА ЭНРАЙТ

*Корректоры* ОЛЬГА ПОРТУГАЛОВА, ИРИНА ДЬЯЧКОВА

*Составление указателя* ОЛЬГА ПОНИЗОВА

*Технический редактор* НАТАЛЬЯ ГЕРАСИМОВА

*Верстка* КИРИЛЛ ВАСИЛЬЕВ

Настоящее издание не содержит возрастных ограничений, предусмотренных федеральным законом "О защите детей от информации, причиняющей вред их здоровью и развитию" (№ 436-ФЗ)

Общероссийский классификатор продукции  
ОК-005-93, том 2; 953000 — книги, брошюры.

Подписано в печать 15.09.2016. Формат 60х90/8  
Бумага офсетная. Гарнитура Warnock  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 88,0  
Тираж 4000 экз. Заказ №3989/16.

Отпечатано в соответствии с предоставленными материалами  
в ООО "ИПК Парето-Принт", 170546, Тверская область,  
Промышленная зона Боровлево-1, комплекс №3А, www.pareto-print.ru

ООО "Издательство АСТ",  
129085 г. Москва, Звездный бульвар, д. 21, строение 3, комната 5  
Наш электронный адрес: [www.ast.ru](http://www.ast.ru)  
E-mail: [info@corpus.ru](mailto:info@corpus.ru)

"Баспа Аста" деген ООО  
129085 г. Мәскеу, жұлдызды гүлзар, д. 21, 3 құрылым, 5 бөлме  
Біздің электрондық мекенжайымыз: [www.ast.ru](http://www.ast.ru)  
E-mail: [info@corpus.ru](mailto:info@corpus.ru)

Қазақстан Республикасында дистрибьютор және өнім бойынша арыз-талаптарды  
қабылдаушының өкілі «РДЦ-Алматы» ЖШС, Алматы қ., Домбровский көш., 3"а", литер  
Б, офис 1.  
Тел.: +7 (727) 251 5989, 90, 91, 92, факс: +7 (727) 251 5812, доб. 107  
E-mail: [RDC-Almaty@eksmo.kz](mailto:RDC-Almaty@eksmo.kz)  
Өнімнің жарамдылық мерзімі шектелмеген

По вопросам оптовой покупки книг обращаться по адресу:  
123317 г. Москва, Пресненская наб., д. 6, стр. 2, БЦ "ИмпериЯ", а/я №5  
Тел.: (499) 951 6000, доб. 574

Охраняется законом РФ об авторском праве. Воспроизведение всей книги или любой  
ее части воспрещается без письменного разрешения издателя. Любые попытки  
нарушения закона будут преследоваться в судебном порядке.



9 785170 854301





Профессор Виргинского университета Луис Блумфилд, удостоенный множества наград за свои исследования в области атомной физики, физики конденсированного состояния и оптики, как никто другой, умеет говорить о науке с широкой аудиторией. Еще мальчиком Блумфилд разобрал на мелкие части десятки предметов и провел сотни химических опытов, чтобы понять, как законы науки действуют в обычной жизни. А став ученым, посвятил множество сил и времени тому, чтобы сделать это знание доступным обычным людям. Его книга «Как все работает» увлекательно и понятно объясняет, почему лампочки горят, стиральный порошок отстирывает грязь, самолеты летают, айподы играют музыку, а кухонные ножи не ломаются. Прочитав ее, вы ни за что не станете разогревать в микроволновке еду в фольге или краситься при искусственном свете, если у вас свидание в парке. Но самое главное — вы начнете лучше ориентироваться не просто в современном мире, но и в современной науке.

“ Эта книга будет увлекательным и познавательным чтением для всех — и для любознательного дилетанта, и для маститого ученого, и для начинающего студента-физика; от того, что мир оказался не таким чужим и таинственным, всем станет только легче.

**Карл Уимаң, лауреат Нобелевской премии по физике**

“ Я стараюсь говорить о науке так, чтобы было понятно всем. Я посвятил кропотливой работе над этой книгой тысячи часов, чтобы вы читали ее как роман, а не просто украсили ею книжную полку. Я не волшебник, а физик, и моей целью всегда было выдать все секреты. Надеюсь, теперь вы убедитесь, что я достиг своей цели.

“ Неважно, сколько вам лет — десять или восемьдесят — вы получите множество знаний из области физики. А самое главное — обнаружите, что наука и вправду часть вашей повседневной жизни.

**Луис А. Блумфилд**



Книжные проекты  
Дмитрия Зими́на

Эта книга издана в рамках программы “Книжные проекты Дмитрия Зими́на” и продолжает серию “Библиотека фонда «Династия»”.

**ПОЛИТЕХ**

Политехнический музей рекомендует: Эта книга издана при поддержке музея и одобрена его экспертами. Поддержка Политехнического музея — знак научного качества книги.