

ВЫСШЕЕ  
ПЕДАГОГИЧЕСКОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

---

Г. А. Бордовский

# Физические ОСНОВЫ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

---

2-е издание, исправленное

Допущено  
Министерством образования  
Российской Федерации  
в качестве учебного пособия  
для студентов высших учебных заведений,  
обучающихся по направлению 540100  
Естественнонаучное образование



ДРОФА  
Москва • 2004

УДК 50(075.8)  
ББК 20я73+22.3я73  
Б82

Рецензенты:

д-р физ.-мат. наук, проф. С. Д. Ханин,  
д-р физ.-мат. наук, проф. Ю. А. Даринский

**Бордовский, Г. А.**  
Б82 **Физические основы естествознания : пособие для вузов /**  
**Г. А. Бордовский. — 2-е изд., испр. — М. : Дрофа, 2004. —**  
**224 с. : ил.**

ISBN 5-7107-6967-3

В пособии сжато и доступно изложены важнейшие принципы и законы физики, необходимые для понимания современного естествознания как интегративной учебной дисциплины. Вводная глава содержит весь нужный математический аппарат, поэтому пособием можно пользоваться вне зависимости от предшествующих математических курсов и на любом этапе изучения курса естествознания, в качестве дополнительного материала.

Описаны многообразные применения физики в естественных науках и медицине. В конце каждой главы приводятся контрольные вопросы и упражнения, помогающие глубже уяснить физический смысл самых различных природных явлений. Многие задачи могут представлять самостоятельный интерес, поскольку касаются практических аспектов естествознания.

*Для студентов, обучающихся по направлению 540100 Естественнонаучное образование. Может быть полезно студентам-биологам, химикам, медикам, студентам некоторых специальностей сельскохозяйственных наук, учителям естествознания и др.*

УДК 50(075.8)  
ББК 20я73+22.3я73

ISBN 5-7107-6967-3

© ООО «Дрофа», 2004

---

## ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ СВЕДЕНИЯ

### 1.1. ФИЗИКА И ЕСТЕСТВОЗНАНИЕ

Современная физика — это наука, которую изучают не только физики, но и биологи, химики, врачи, инженеры, агрономы, геологи, моряки — люди самых различных профессий. Почему же ей уделяется столько внимания? Так ли она необходима? В ответ можно было бы напомнить, например, об открытии физиками колоссальной энергии, таящейся в атомном ядре, способной превратить мир как в цветущий сад, так и в безжизненную пустыню, или о том, что физика обеспечила революцию в информационной сфере, в способах коммуникаций и т. д. Однако эти примеры все же не дают полного ответа на поставленные вопросы. Понять истинное значение физики, ее место среди других наук, ее роль в познании мира можно лишь после ее изучения. Поэтому в самом начале курса очень трудно исчерпывающе ответить: «Что такое физика?». Предварительно можно сказать, что *физика изучает самые общие законы, которым подчиняется материальный мир, развивающийся в пространстве и времени*. Например, познает свойства мельчайших частиц материи, изучает строение земной коры, выясняет механизмы возникновения ураганов, решает проблемы рождения, развития и структуры Вселенной в целом. Нет другой естественной науки, которая охватывала бы столь огромный диапазон явлений. Поэтому любая из естественных наук так или иначе связана с физикой или опирается на нее.

В качестве примера коснемся значения физики для биологии. Известно, что живая ткань обладает определенными физическими параметрами: электрической проводимостью, удельной теплоемкостью, устойчивостью к механическим деформациям и другими. При изменении биологических функций организма меняются и его физические характеристики, что используется в диагностике заболеваний. Так, при воспалительных процессах наблюдается повышение температуры, при туберкулезе понижается прозрачность легких, при некоторых за-

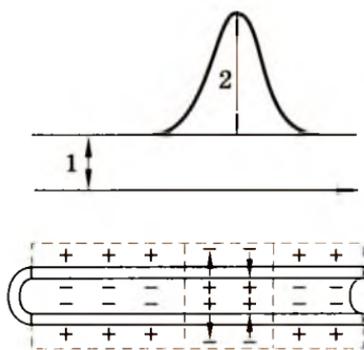


Рис. 1.1  
1 — потенциал покоя;  
2 — потенциал возбуждения

болеваниях нервной системы растет артериальное давление. Кроме того, в живых организмах неразрывно сочетаются физические, химические, биологические и другие факторы. Например, глаз представляет собой сложную систему, содержащую оптическую часть (хрусталик), электрохимический преобразователь световой энергии (сетчатка), автоматическое устройство (механизм аккомодации, сужения и расширения зрачка) и др. Или взять процессы, протекающие в нервной системе. Часто употребляют выражение:

«Из коры головного мозга сигнал передается на нервные окончания». Какой сигнал? Как передается? Ответы на эти вопросы будут чисто «физическими». Нервные волокна — это, упрощенно говоря, тоненькие трубочки, стенки которых представляют своего рода конденсатор (рис. 1.1). При возбуждении они способны пропускать ионы, и тогда на каком-то участке этот конденсатор разряжается. Процесс переходит на соседние участки, и по трубочке пробегает волна «разрядки» — электрический потенциал возбуждения 2, заметно превышающий потенциал покоя 1. В следующее мгновение первоначальное состояние нерва восстанавливается.

В конечном счете, на основе физики можно объяснить все процессы в живом организме вплоть до работы механизма наследственности.

Неоспорима роль физики в совершенствовании экспериментальных методов исследований. Медицина, биология, химия, геология, география и другие науки сделали качественный скачок, освоив физические методы исследований (сложную прецизионную аппаратуру, математическую обработку результатов, создание моделей). С другой стороны, многие области физики стали самостоятельными науками: биофизика, астрофизика, геофизика, физическая химия, электроника и другие.

Таким образом, знание основ физики необходимо не только самым различным специалистам, но и практически всем людям для понимания устройства материального мира и протекающих в нем явлений.

Законы физики носят приближенный характер, но с ее развитием мы все более уточняем свои представления о свойствах материи, открываем новые явления и взаимосвязи. Физика постоянно пополняется новыми законами, которые часто оказыва-

ются очень сложными для понимания, а порой и противоречат кажущемуся здравому смыслу. Физические законы, справедливые в одной области явлений, нельзя автоматически переносить на другую. Рассмотрим такой пример. Пассажир летит со скоростью 1080 км/ч (300 м/с) в город, расположенный на расстоянии 10800 км. Ясно, что на такое путешествие потребуется 10 часов. Однако если пассажир, сидя в самолете, попытается проверить это по неким идеальным часам, то обнаружит, что прошло лишь 9,99999999995 ч. Такое отличие может показаться несущественным, но тем не менее в системе, движущейся со скоростью  $v$ , согласно теории относительности Эйнштейна,

время замедляется в  $\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$  раз (где  $c$  — скорость распространения света), и в космических полетах, будь они возможны с околосветовыми скоростями, это обстоятельство могло бы иметь большие последствия\*.

Чтобы оценить возможности физики в объяснении явлений материального мира, полезно осознать, какими размерами материальных тел, какими расстояниями между объектами оперирует физика, каковы временные интервалы, в которых происходят физические явления.

На рис. 1.2 представлены в логарифмическом масштабе размеры и расстояния, доступные для современных физических исследований. Легко видеть, что человек и окружающие его предметы (дома, деревья, автомобили, книги, песчинки и т. п.) занимают очень незначительную часть всей шкалы масштабов. Но благодаря физическим методам исследования ему оказываются доступными для изучения и ядра атомов, и бактерии, и галактики.

Похожая ситуация наблюдается и на шкале времени, представленной на рис. 1.3. Проследить развитие различных процессов в столь широком временном интервале опять-таки позволили физические методы измерения времени.

\* \* \*

Настоящее пособие не является курсом физики. В нем не рассматриваются многие важные и интересные разделы современной физики, однако изложен материал, крайне необходимый для понимания естествознания как обобщенной науки о

---

\* Следствия из теории относительности подробнее изложены в разделе 2.6.

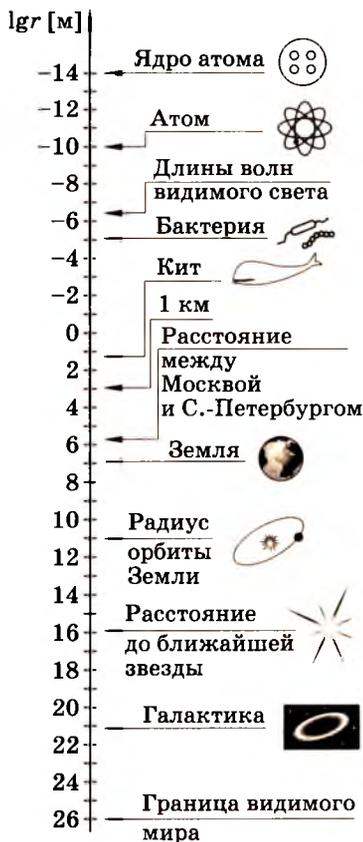


Рис. 1.2

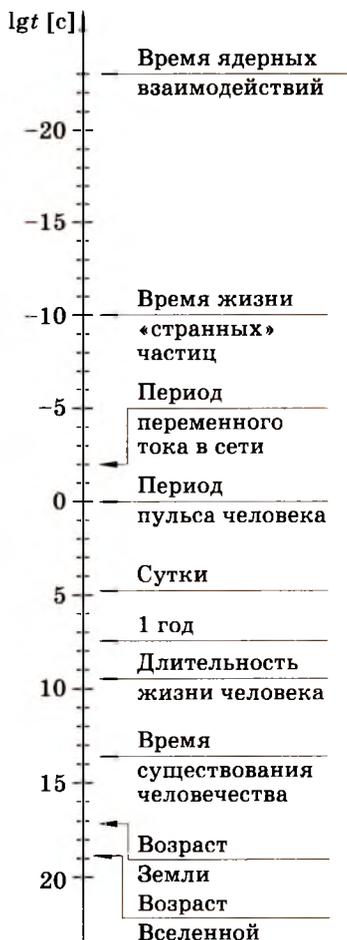


Рис. 1.3

живой и неживой природе, а также для того, чтобы избежать нередко встречающихся искаженных представлений о природных явлениях и процессах.

## 1.2. КРАТКОЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Многие фундаментальные физические идеи можно сформулировать без громоздкого математического аппарата, но серьезное изучение физики немислимо без определенной математической подготовки. Помимо знания алгебры, геометрии и тригонометрии необходимо иметь представления о началах дифференциального и интегрального исчисления, о векторной алгебре.

### 1.2.1. Графики функций

Как известно, различные физические величины и параметры могут зависеть друг от друга, от координаты в пространстве, меняться со временем, иными словами, являются функциями других переменных величин. Сам человек (точнее, многочисленные параметры его организма) является функцией многих переменных — скажем, Солнца или колебаний магнитного поля Земли. В связи с этим изучение функциональных зависимостей — задача, типичная для всех естественных наук.

Функциональную зависимость одной величины от другой удобно представлять графически. На рис. 1.4 приведены графики и формулы некоторых наиболее употребительных элементарных функций (элементарными в математике называются функции, выражаемые алгебраическими и тригонометрическими формулами). Этим формулам и, соответственно, графикам вполне достаточно для моделирования почти всех физических явлений, изучаемых в данной книге.

Однако на практике физические параметры часто находятся в более сложной зависимости, особенно при совместном действии нескольких факторов. Удобство графического представления функций заключается в том, что даже самые сложные из них можно представить суперпозицией (наложением) нескольких простых, выявляя таким образом влияние тех или иных факторов на результирующий процесс.

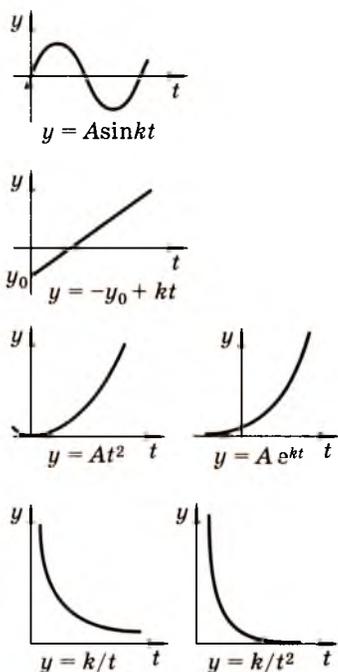


Рис. 1.4

### 1.2.2. Дифференцирование функций

Рассмотрим такой пример. В ходе экспериментов по выращиванию микроорганизмов установлено, что биомасса  $M$  вначале бурно растет, но из-за истощения питательного раствора через некоторое время рост замедляется, затем останавливается, и наконец количество биомассы начинает уменьшаться. Этот процесс показан на рис. 1.5 сплошной кривой.

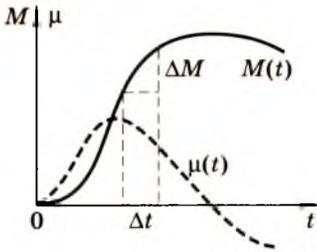


Рис. 1.5

Возьмем теперь приращение времени  $\Delta t$  сколь угодно малым. Это значит, что оно всегда будет меньше любой заранее заданной малой величины. Такие приращения называются в математике бесконечно малыми и обозначаются  $dt$  — дифференциал  $t$ . В нашей задаче при бесконечном уменьшении промежутка времени  $\Delta t$  будет соответственно уменьшаться и  $\Delta M$ . Взяв отношение бесконечно малых приращений  $dM$  и  $dt$ , мы получим уже мгновенную скорость роста биомассы в некоторый момент времени:

$$\mu = \frac{dM}{dt}.$$

В общем случае отношение бесконечно малых приращений аргумента и функции называется **производной**, а операция нахождения производной для данной функции — **дифференцированием**. Производная функции  $M(t)$  по аргументу  $t$  представлена на рис. 1.5 штриховой линией.

Из рассмотренного примера видно, что обращение к дифференциалам позволяет анализировать любые сложные процессы, потому что в области бесконечно малых величин их можно считать протекающими равномерно. Учитывая это, большинство уравнений, отражающих реальные процессы в физике и технике, записывают в дифференциальной форме. Существует определенный математический метод дифференцирования функций, с которым мы познакомимся ниже.

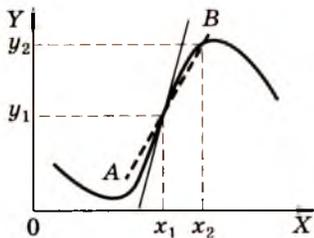


Рис. 1.6

Часто требуется определить скорость роста биомассы в различные моменты времени. Наиболее легко вычислить среднюю за время эксперимента скорость роста, поделив всю образовавшуюся биомассу  $M$  на полное время эксперимента  $t$ :  $\mu_{\text{cp}} = M/t$ . Можно определить среднюю скорость роста и за некоторый меньший промежуток времени  $\Delta t$ :  $\mu_{\text{cp}} = \frac{\Delta M}{\Delta t}$ .

На рис. 1.6 представлена произвольная функция  $y = f(x)$ . Запишем отношение  $\frac{\Delta y}{\Delta x}$ , где  $\Delta x = x_2 - x_1$ .

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x}. \quad (1.1)$$

Как и в предыдущем примере, отношение (1.1) показывает скорость и на-

правление изменения функции в данном интервале  $\Delta x$ . Если  $\Delta y/\Delta x > 0$  — функция возрастает, если же  $\Delta y/\Delta x < 0$  — убывает. При этом  $\Delta y/\Delta x$  есть тангенс угла наклона секущей  $AB$  к оси абсцисс. Для перехода от (1.1) к производной, которую обозначают  $y'$ , нужно найти предел отношения  $\Delta y/\Delta x$ , устремляя  $\Delta x$  к нулю, т. е.

$$y' = \frac{dy}{dx} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x}. \quad (1.2)$$

По величине  $y'$  можно судить, насколько быстро изменяется функция  $f(x)$ . По знаку  $y'$  можно определить, возрастает она или убывает. Кроме того, производная позволяет выяснить, достигает ли где-нибудь  $f(x)$  экстремального (минимального или максимального) значения, поскольку в минимуме или в максимуме  $dy = 0$  при  $dx \neq 0$ .

Из рис. 1.6 и соотношения (1.2) следует, что геометрический смысл производной — это тангенс угла наклона касательной, проведенной к кривой  $y = f(x)$  в данной точке, к оси абсцисс.

Производные всех функций отыскиваются согласно равенству (1.2). Например, требуется определить тангенс угла наклона касательной к параболе  $y = x^2$ .

$$y' = \frac{dy}{dx} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x}; \quad f(x) = x^2; \quad f(x + \Delta x) = (x + \Delta x)^2;$$

$$y' = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{(x + \Delta x)^2 - x^2}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{x^2 + \Delta x^2 + 2\Delta x \cdot x - x^2}{\Delta x} =$$

$$= \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{2x\Delta x + \Delta x^2}{\Delta x}.$$

Поскольку  $\Delta x \rightarrow 0$ , то  $(\Delta x)^2$  будет пренебрежимо малой величиной по сравнению с  $2x\Delta x$ , и тогда

$$y' = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{2x\Delta x}{\Delta x} = 2x,$$

т. е. производная от  $x^2$  равна  $2x$ .

На практике не требуется каждый раз проделывать подобные операции. Математики давно отыскивали производные всех элементарных функций, наиболее употребительные из которых приводятся ниже:

$C' = 0$	$(a^x)' = a^x \ln a$	$(\sin x)' = \cos x$
$(ax)' = a$	$(e^x)' = e^x$	$(\cos x)' = -\sin x$
$(x^n)' = nx^{n-1}$	$(\log_a x)' = 1/x \ln a$	$(\operatorname{tg} x)' = 1/\cos^2 x$
$(1/x^n)' = n/x^{n+1}$	$(\ln x)' = 1/x$	$(\operatorname{ctg} x)' = -1/\sin^2 x$

Если функция  $y$  является произведением двух других функций, т. е.  $y(x) = f(x) \cdot \varphi(x)$ , то  $y'(x) = f(x)\varphi'(x) + f'(x)\varphi(x)$ .

Если же функция  $y$  есть частное от деления одной функции на другую, т. е.  $y(x) = \frac{f(x)}{\varphi(x)}$ , то  $y'(x) = \frac{f'(x)\varphi(x) - \varphi'(x)f(x)}{[\varphi(x)]^2}$ .

### 1.2.3. Интегрирование функций

Рассмотрим теперь пример, обратный предыдущему. На рис. 1.7 представлен график скорости роста биомассы, по которому требуется определить количество образующегося вещества. На языке математики это означает следующее. Скорость  $\mu$  есть производная функции  $M(t)$  по времени. Следовательно,

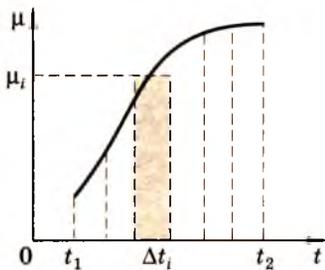


Рис. 1.7

нужно найти функцию по ее производной. Такая математическая операция называется **интегрированием**. Очевидно, что интегрирование обратно дифференцированию так же, как, например, сложение обратно вычитанию, или потенцирование — логарифмированию.

Найдем сначала количество биомассы  $\Delta M_i$ , образовавшееся за некоторый малый промежуток времени  $\Delta t_i$ .

Поскольку в малом промежутке скорость роста биомассы меняется несущественно, то ее значение можно полагать постоянным, и тогда  $\Delta M_i = \mu_i \Delta t_i$ . На рис. 1.7 эта величина соответствует заштрихованной площадке. Полное же количество вещества  $M$ , полученное за время от  $t_1$  до  $t_2$ , можно определить (с некоторой ошибкой), просуммировав все малые площадки  $\Delta M_i$ :

$$M = \sum_{i=1}^N \Delta M_i = \sum_{i=1}^N \mu_i \Delta t_i. \quad (1.3)$$

Точность такого подсчета будет тем выше, чем меньше  $\Delta t_i$ , поэтому можно сказать, что  $M$  есть предел указанной суммы при  $\Delta t_i \rightarrow 0$ :

$$M = \lim_{\Delta t_i \rightarrow 0} \sum_{i=1}^N \mu_i \Delta t_i = \int_{t_1}^{t_2} \mu(t) dt. \quad (1.4)$$

Предел суммы (1.3), обозначенный в (1.4) как  $\int_{t_1}^{t_2} \mu dt$ , называется **определенным интегралом** функции  $\mu(t)$  по  $t$  (от  $t_1$  до  $t_2$ ).

Однако очевидно, что определенный интеграл является фиксированной величиной, а не функцией. В общем же случае ин-

тегрирование есть нахождение именно функции по ее производной. Соответствующая операция записывается как

$$y(x) = \int f(x)dx,$$

где  $y(x)$  — искомая функция\*, а  $f(x)$  — ее производная.

Пусть, например,  $f(x) = 2x$ , тогда  $y(x) = \int 2x dx$ . Это значит, что  $y(x)$  есть такая функция, производная от которой равна  $2x$ . Используя формулу дифференцирования для  $x^n$  (см. с. 9), легко проверить, что этой функцией является  $y = x^2$ , поэтому

$$y = \int 2x dx = x^2. \quad (1.5)$$

Однако этот ответ еще не совсем точен, потому что производную, равную  $2x$ , имеет не только функция  $x^2$ , но и  $x^2 + C$ , где  $C$  — любая константа. Выражение (1.5) правильнее записать как

$$y = \int 2x \cdot dx = x^2 + C.$$

Из-за наличия константы  $C$  интеграл такого вида называется **неопределенным интегралом**. Наличие неопределенной константы не является недостатком метода, но наоборот, свидетельствует о его силе, поскольку дает общее решение задачи. Конкретное решение получается из общего при задании определенных начальных условий. Допустим, из всех функций  $y = x^2 + C$  нас интересует такая, которая при  $x = 0$  принимает значение, равное 1. Из этого условия следует, что  $1 = 0 + C$ ;  $C = 1$  и  $y = x^2 + 1$ .

В отличие от неопределенного интеграла, который представляет собой первообразную функцию, определенный интеграл имеет иной смысл: это площадь, ограниченная подынтегральной функцией при изменении аргумента от одного значения до другого. Отвлекаясь от наглядного графического представления, определенный интеграл показывает изменение первообразной функции при заданном изменении аргумента.

В общем случае определенный интеграл записывается как

$$y(x) = \int_a^b f(x)dx, \text{ где } a \text{ и } b \text{ — пределы изменения аргумента } x.$$

Вычисление определенного интеграла сводится к следующему: 1) нахождение первообразной  $y(x)$ ; 2) определение ее значения при  $x = b$ ; 3) определение ее значения при  $x = a$ ; 4) нахождение разности  $y(b) - y(a)$ , которая и является искомой величиной. Пусть, например, требуется найти площадь, ограниченную кривой  $f(x) = 3x^2$  при изменении значений  $x$  от 2 до 5, т. е.  $y = \int_2^5 3x^2 dx$  (рис. 1.8). Легко проверить, что первообразная от  $3x^2$  равна  $x^3$ ,

\* В математике искомую функцию называют *первообразной*.

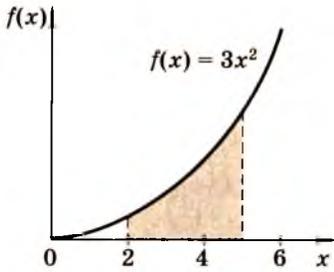


Рис. 1.8

поэтому  $y = \int_2^5 3x^2 dx = x^3 \Big|_2^5 = 125 - 8 = 117$  (единиц площади).

Очевидно, что главная проблема интегрирования заключается в нахождении первообразной. Для этой цели разработано множество различных способов и приемов, которые мы здесь не рассматриваем, поскольку интегралы от большинства элементарных функций давно известны и их называют табличными. Ниже приведены некоторые наиболее простые из таких интегралов (константа  $C$  для краткости везде опущена):

$$\int x^n dx = \frac{x^{n+1}}{n+1} \quad \int \sin x dx = -\cos x$$

$$\int \frac{dx}{x} = \ln |x| \quad \int \cos x dx = \sin x$$

$$\int e^x dx = e^x \quad \int \frac{dx}{\sin^2 x} = -\operatorname{ctg} x$$

$$\int a^x dx = \frac{a^x}{\ln a} \quad \int \frac{dx}{\cos^2 x} = \operatorname{tg} x$$

При вычислении интегралов необходимо учитывать следующие правила.

1. Интеграл от суммы функций равен сумме интегралов от слагаемых.

2. Постоянный коэффициент можно выносить за знак интеграла.

### 1.2.4. Операции с векторами

Многие физические параметры (сила, скорость, импульс и др.) характеризуются не только величиной, но и направлением, т. е. являются векторами. С помощью векторов также удобно представлять различные процессы, например, колебательное движение. В связи с этим операции с векторами занимают в физике важное место.

Векторные величины могут быть представлены графически — стрелкой, построенной в определенном масштабе, или аналитически. На рис. 1.9 вектор  $\vec{A}$  задан единичным вектором  $\vec{r}$ , а на

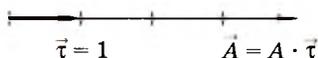


Рис. 1.9

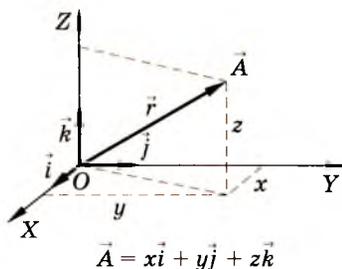


Рис. 1.10

рис. 1.10 — тройкой взаимно перпендикулярных единичных векторов  $\vec{i}$ ,  $\vec{j}$  и  $\vec{k}$ . Вектор, начало которого совпадает с началом системы координат, а конец — с некоторой точкой A, называется радиусом-вектором  $\vec{r}$  этой точки.

Сложение и вычитание векторов удобнее всего производить графически (см. соответственно рис. 1.11 и 1.12).

Деление вектора на вектор невозможно, зато умножение векторных величин, в отличие от скалярных, возможно двумя способами.

**Скалярное произведение** векторов является скалярной величиной и записывается в виде  $A = (\vec{B}, \vec{C})$ . Величина A определяется выражением

$$A = BC \cos \alpha,$$

где B и C — модули векторов, а  $\alpha$  — угол между ними. В физике примером скалярного произведения может служить формула для вычисления работы:  $A = (\vec{F}, \vec{S}) = FS \cos \alpha$ .

Поскольку  $F \cos \alpha = F_S$  и  $S \cdot \cos \alpha = S_F$ , где  $F_S$  и  $S_F$  есть проекции одного вектора на направление другого (рис. 1.13), скалярное произведение иначе можно записать как  $A = F_S \cdot S = F \cdot S_F$ .

Векторное произведение векторов является векторной величиной и записывается в виде  $\vec{A} = [\vec{B}, \vec{C}]$ . Его модуль определяется выражением

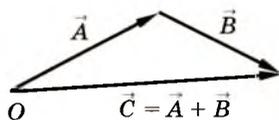


Рис. 1.11

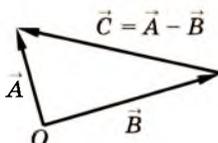


Рис. 1.12

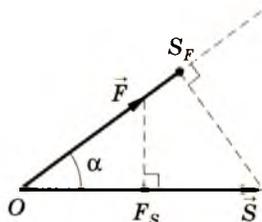


Рис. 1.13

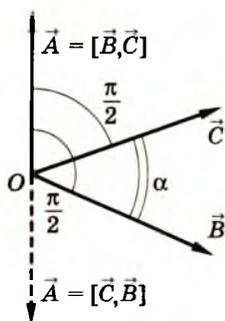


Рис. 1.14

$$A = BC \sin \alpha,$$

где  $A$ ,  $B$  и  $C$  — модули векторов, а  $\alpha$  — угол между векторами  $\vec{B}$  и  $\vec{C}$ . Вектор  $\vec{A}$  перпендикулярен обоим векторам-сомножителям, а его направление определяется известным правилом правого винта (рис. 1.14). В физике примером векторного произведения могут служить момент силы, момент количества движения и др.

Отметим, что скалярное произведение принято обозначать круглыми скобками, а векторное — квадратными, причем сомножители в скобках разделяются запятой (как это и сделано выше).

### 1.3. СИСТЕМЫ ЕДИНИЦ ИЗМЕРЕНИЯ

Одна из важнейших задач физики — установление взаимосвязей между физическими величинами, что невозможно без их измерения. Измерить физическую величину — значит сравнить ее с однотипной величиной, принятой за эталон (единицу измерения). В принципе для любой величины можно выбрать свой эталон, однако, это породит огромное число единиц измерения и очень затруднит количественное представление физических закономерностей. На практике поступают иначе: эталоны нескольких величин принимают за основные единицы, а затем, пользуясь известными взаимосвязями, определяют остальные производные от основных. Например, если в качестве основных величин приняты длина и время с эталонами, соответственно, 1 метр (м) и 1 секунда (с), то очевидно, что для измерения скорости нет смысла вводить особую единицу — она просто измеряется в метрах в секунду (м/с).

Выбор основных и связанных с ними производных единиц определяет *систему единиц* измерения физических величин.

Основные единицы выбираются так, чтобы запись физических законов была более удобной и простой. В частности, в любую систему единиц в качестве основных входят наиболее «фундаментальные» единицы — длины, времени и массы. Существует несколько систем единиц. В нашей стране с 1 января 1963 г. в соответствии с рекомендацией XI Генеральной международной конференции по мерам и весам введена как предпочтительная Международная система единиц (СИ). Большинство стран мира также используют эту систему. В таблице приведены основные, дополнительные и производные единицы, используемые в системе СИ.

## Международная система единиц (СИ)

Физическая величина	Единица измерения	Обозначение единицы
---------------------	-------------------	---------------------

### Основные единицы

Длина	метр	м
Масса	килограмм	кг
Время	секунда	с
Температура	градус Кельвина	К
Сила электрического тока	ампер	А
Сила света	свеча	св

### Дополнительные единицы

Плоский угол	радиан	рад
Телесный угол	стерадиан	стерад

### Некоторые производные единицы

Скорость	метр в секунду	м/с
Угловая скорость	радиан в секунду	рад/с
Угловое ускорение	радиан на секунду в квадрате	рад/с <sup>2</sup>
Сила	ньютон	Н
Работа, энергия	джоуль	Дж
Мощность	ватт	Вт
Количество электричества	кулон	Кл
Потенциал электрического поля	вольт	В
Напряженность электрического поля	вольт на метр	В/м

Физическая величина	Единица измерения	Обозначение единицы
Электрическое сопротивление	ом	Ом
Электрическая емкость	фарада	Ф
Поток магнитной индукции	вебер	Вб
Индуктивность	генри	Гн
Магнитная индукция	тесла	Тл
Напряженность магнитного поля	ампер на метр	А/м
Световой поток	люмен	лм
Яркость	свеча на метр квадратный	св/м <sup>2</sup>
Освещенность	люкс	лк

В физике, химии, других науках достаточно широко используются и некоторые внесистемные единицы, например, единица длины — ангстрем ( $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ м}$ ); единица энергии — электрон-вольт ( $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ ); единица массы — атомная единица массы ( $1 \text{ а. е. м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ ) и др.

Соотношение, определяющее связь той или иной единицы с основными, называется *размерностью*. Размерность любой величины обозначают ее буквенным символом в квадратных скобках, а размерность производной величины может записываться также и в развернутом виде — как произведение буквенных символов соответствующих основных величин, возведенных в ту или иную степень. Например, размерность силы  $[f] = \text{MLT}^{-2}$ , где М, L и Т — символы массы, длины и времени. В физике существует вполне очевидное правило размерности: обе части формул, выражающих физические законы, как и все слагаемые в обеих частях, должны иметь одинаковую размерность. Проанализируем с точки зрения этого правила закон всемирного тяготения  $F = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2}$ . Размерность силы  $[f] = \text{MLT}^{-2}$ , размерность же дроби в правой части —  $\text{M}^2\text{L}^{-2}$ . Следовательно, коэффициент  $\gamma$  должен быть также размерным:  $\text{L}^3\text{M}^{-1}\text{T}^{-2}$ . Только при этом ус-

ловии между левой и правой частями можно поставить знак равенства.

*Любые вновь полученные формулы всегда полезно анализировать с точки зрения правила размерности.*

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И УПРАЖНЕНИЯ

1. Верно ли, что на шкале размеров и расстояний (см. рис. 1.2) человека следует поместить около отметки 0?

2. Приведите примеры каких-либо естественных систем, в которых те или иные события происходят через равные промежутки времени.

3. Будут ли различаться размерности скалярного и векторного произведения двух векторных величин?

4. Найти производные следующих функций переменной  $x$ :

а)  $y = c$ ; б)  $y = cx$ ; в)  $y = cx^4 + a$ ; г)  $y = \ln(x + 1)$ ; д)  $y = a \sin x + \frac{B}{x^2}$ ; е)  $y = \ln \sqrt{x}$ ; ж)  $y = \operatorname{tg} x - a \sqrt{x}$ .

5. Найти неопределенные интегралы:

а)  $\int x^2 dx$ ; б)  $\int \frac{dx}{\sqrt{x}}$ ; в)  $\int (5x^3 + 3x^2 + 2x - 1) dx$ ; г)  $\int \frac{2}{\cos x} dx$ .

6. Найти определенные интегралы:

а)  $\int_1^3 (3x^2 - 2x - 1) dx$ ; б)  $\int_{\alpha}^{\beta} \frac{3}{x} dx$ ; в)  $\int_0^1 e^x dx$ ; г)  $\int_0^{\pi} \cos x dx$ .

# МЕХАНИЧЕСКОЕ ДВИЖЕНИЕ

Механическое перемещение материальных тел относительно друг друга — простейший вид движения материи — изучает один из разделов физики — классическая механика. Законы классической механики описывают движение всех объектов в природе от космических тел до отдельных молекул\*. Механика состоит из трех частей: кинематики, динамики и статики. В кинематике и динамике изучается движение тел. Статика, как явствует из самого ее названия, изучает условия неподвижного равновесия тел под действием сил. Этот раздел механики в данной книге не рассматривается.

## 2.1. КИНЕМАТИКА

Кинематика изучает движение, отвлекаясь как от природы движущегося тела, так и от действующих на него сил. Задача кинематики — рассмотрение скорости, ускорения, траектории движения тела, его положения в пространстве.

Механическое движение — явление относительное. Любое тело может двигаться относительно одних тел и одновременно покоиться относительно других. Например, искусственный спутник Земли, запущенный на круговую экваториальную орбиту радиусом 42400 км, неподвижен относительно Земли, но движется относительно Солнца и звезд.

Тело, относительно которого рассматривается движение, называется телом отсчета, а система координат, снабженная часами и связанная с ним, — *системой отсчета*.

### 2.1.1. Скорость

Рассмотрим поступательное прямолинейное движение тела, не обязательно равномерное — например, перемещение автомобиля по прямолинейному участку пути. На рис. 2.1 представлено

---

\* Движение микрочастиц подчиняется квантовой механике, которая рассматривается в главе 5.

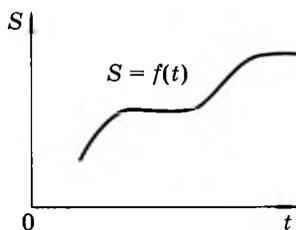


Рис. 2.1

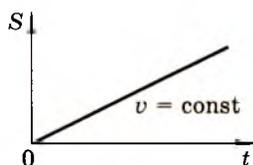


Рис. 2.2

изменение пройденного пути со временем, т. е. функция  $S = f(t)$ . Как следует из раздела 1.2, *мгновенную скорость* движения здесь можно определить как  $v = \frac{dS}{dt}$ .

Равномерное движение является частным случаем, при котором  $v = \frac{dS}{dt} = \text{const}$ . На графике (рис. 2.2) такое движение изобразится прямой линией, тангенс угла наклона которой равен модулю скорости  $v$ . При равномерном движении мгновенная скорость в любой момент времени равна средней, т. е.

$$v = \frac{S}{t}.$$

В общем случае, когда траектория движения не прямолинейна, положение тела в пространстве можно задать радиусом-вектором  $\vec{r}$  (рис. 2.3), а мгновенную скорость определить как

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt}. \quad (2.1)$$

Из выражения (2.1) следует, во-первых, что скорость есть величина векторная, т. е. характеризуется не только абсолютным значением, но и направлением, а во-вторых — что в любой момент времени она направлена по касательной к траектории движения.

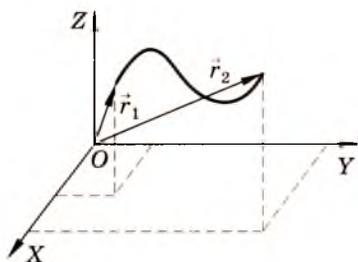


Рис. 2.3

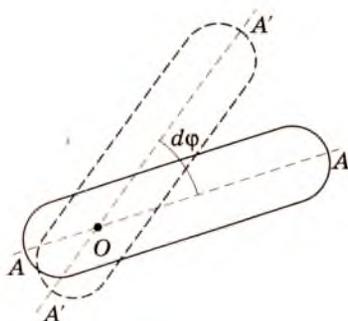


Рис. 2.4

Понятие скорости применимо не только к поступательному движению, но и к вращательному, в котором роль пройденного пути играет угол поворота  $\varphi(t)$  (рис. 2.4). Величина

$$\vec{\omega} = \frac{d\vec{\varphi}}{dt}$$

называется **угловой скоростью**. Направление вектора  $\vec{\omega}$  определяется правилом правого винта. Например, если тело на рис. 2.4 вращается против часовой стрелки, то вектор направлен вдоль оси вращения к читателю.

Каждая точка вращающегося тела обладает и определенной линейной скоростью. Линейная и угловая скорости взаимосвязаны. Действительно, при повороте на угол  $d\varphi$  точка, отстоящая от оси вращения на расстояние  $r$ , пройдет путь  $ds = rd\varphi$ , поэтому  $\frac{ds}{dt} = r \frac{d\varphi}{dt}$  или

$$v = \omega r.$$

### 2.1.2. Ускорение

В большинстве случаев скорость движения не бывает постоянной. Например, на рис. 2.5 представлен график изменения скорости велосипедиста. Характеристикой быстроты изменения скорости со временем является **ускорение**, которое определяется как производная от скорости по времени

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}.$$

Для вращательного движения по аналогии вводится **угловое ускорение**

$$\vec{\beta} = \frac{d\vec{\omega}}{dt}.$$

Ускорение — величина векторная. Оно показывает изменение скорости не только по величине, но и по направлению. В разделе 2.2 будет показано, что при поступательном движении направление ускорения всегда совпадает с направлением действующей силы. Угловое же ускорение направлено по оси вращения.

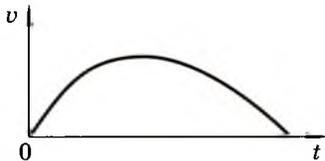


Рис. 2.5

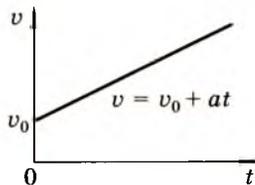


Рис. 2.6

На практике часто осуществляется равнопеременное движение ( $\vec{a} = \text{const}$ ). В этом случае  $a = \frac{v}{t}$  или  $v = at$ , а график  $v(t)$  представляет прямую линию (рис. 2.6):

$$v = v_0 + at, \quad (2.2)$$

где  $v_0$  — начальная скорость.

Определим путь, который проходит тело за время от 0 до  $t$  при равноускоренном движении. Искомая величина равна определенному интегралу  $S = \int_0^t v dt = \int_0^t (v_0 + at) dt = v_0 t \Big|_0^t + \frac{at^2}{2} \Big|_0^t$ , и в итоге

$$S = v_0 t + \frac{at^2}{2}. \quad (2.3)$$

Полученный результат наглядно демонстрирует силу интегрального исчисления — ведь для вывода формулы (2.3) без этого аппарата приходится проводить сложные дополнительные рассуждения.

Рассмотрим движение тела по окружности с постоянной по величине скоростью (рис. 2.7). Пусть за время  $dt$  тело переместится на некоторый угол  $d\phi$ , а вектор скорости  $\vec{v}$  изменится по направлению и примет значение  $\vec{v} + d\vec{v}$ . Перенесем вектор  $\vec{v} + d\vec{v}$  в точку  $A$  и найдем  $d\vec{v}$  векторным вычитанием. Из подобия  $\triangle ACD$  и  $\triangle AOB$  следует, что  $\frac{dv}{v} = \frac{dR}{R}$ ,  $dv = \frac{dR}{R} v$ , и тогда  $a = \frac{dv}{dt} = \frac{dR}{dt} \frac{v}{R} = v \frac{v}{R}$ , т. е.

$$a = \frac{v^2}{R}.$$

Решим вопрос о направлении вектора  $\vec{a}$ . Видно, что оно совпадает с направлением вектора  $d\vec{v}$ . В пределе угол  $d\phi$  стремится к 0, а углы  $ADC$  и  $ACD$  в равнобедренном треугольнике  $ADC$  — к  $\frac{\pi}{2}$ , так что  $d\vec{v} \perp \vec{v}$  или  $d\vec{v} \parallel \vec{R}$ .

Поэтому ускорение  $\vec{a}$  направлено к центру вращения. Такое ускорение принято называть **центростремительным** или **нормальным**. Нормальное ускорение обозначают знаком  $\vec{a}_n$ .

Если тело вращается с переменной по величине скоростью, то дополнительно к нормальному возникает ускорение  $a_t = \frac{dv}{dt}$ , направлен-

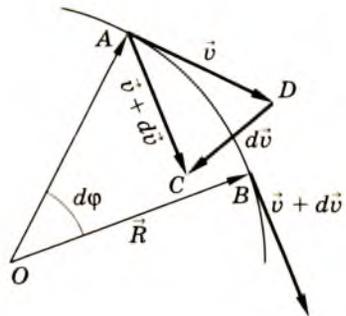


Рис. 2.7

ное по касательной к траектории. В силу этого оно называется **тангенциальным** ускорением. Величина полного ускорения при этом равна

$$a = \sqrt{\left(\frac{v^2}{R}\right)^2 + \left(\frac{dv}{dt}\right)^2}. \quad (2.4)$$

Формула (2.4) справедлива при движении тела по любой криволинейной траектории.

### 2.1.3. Сложное движение

Часто материальные объекты участвуют одновременно в двух или более простых движениях. Примером может служить банка из-под лимонада, выброшенная из окна равномерно идущего поезда\*. Во-первых, она продолжает равномерное движение вдоль рельсов со скоростью поезда. Во-вторых, равноускоренно падает перпендикулярно рельсам. В-третьих, она совершает вращательное движение относительно одной или даже нескольких осей. Такое рассмотрение позволяет свести сложное движение к нескольким простым.

Знание законов кинематики позволяет решить множество конкретных задач, ответить на многие практические вопросы. Рассмотрим это на примере тела, брошенного под углом к горизонту (скажем, снаряда, вылетающего из дула орудия). Для упрощения задачи будем считать, что тело имеет пренебрежимо малый размер по сравнению с пройденным расстоянием, и что оно вылетело в начальный момент времени  $t_0$  со скоростью  $v_0$  под углом  $45^\circ$  к горизонту (рис. 2.8). Нужно определить несколько важных параметров: на какое расстояние  $S$  улетит тело, сколько на это потребуется времени  $t$  и на какую максимальную высоту  $h$  оно поднимется при движении.

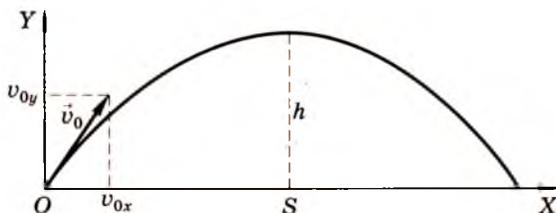


Рис. 2.8

Для ответа на эти вопросы данное сложное движение рассмотрим в виде двух движений: по оси  $X$  и по оси  $Y$ . Поскольку угол вылета  $45^\circ$ , то

\* Здесь и далее мы пренебрегаем влиянием воздуха.

$$v_{0x} = v_{0y} = \frac{v_0}{\sqrt{2}}.$$

Вначале рассмотрим движение тела по оси  $Y$ . На основании (2.2) изменение скорости по вертикали можно записать в виде

$$v_y = v_{0y} - gt. \quad (2.5)$$

Здесь  $g$  означает ускорение свободного падения, а знак  $(-)$  говорит о том, что при движении вверх тело постепенно замедляется. В верхней точке  $v_y = 0$ , поэтому из (2.5) можно непосредственно определить время, за которое тело достигает максимальной высоты

$$t_1 = \frac{v_{0y} - v_y}{g}.$$

Полное время полета будет составлять  $t = 2t_1$ .

На основании (2.3) легко определить высоту подъема:  $h = v_{0y}t - \frac{gt^2}{2}$ .

Наконец, поскольку движение тела вдоль оси  $X$  равномерное, то расстояние, на которое тело улетит по горизонтали, равно  $S = v_{0x}t$ .

Заметим, что полезно привыкнуть решать любые физические задачи сначала в общем виде, и только в самом конце подставлять в полученные «буквенные» формулы конкретные числовые значения. Так мы и поступили в данном случае. Учтя, что ускорение свободного падения  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ , произведя необходимые вычисления и округлив результаты до первого знака после запятой, получим окончательные ответы:  $t = 2,9 \text{ с}$ ,  $h = 10,2 \text{ м}$ ,  $S = 40,7 \text{ м}$ .

В реальных условиях задача может оказаться сложнее — например, если понадобится учесть сопротивление воздуха, боковой ветер и т. п.

## 2.2. ЗАКОНЫ ДИНАМИКИ

Динамика, в отличие от кинематики, изучает движение тел при учете действующих на них сил. Представление о силе возникло у людей еще в глубокой древности (усилие при поднятии груза, сила ветра и т. д.). Однако в физике под силой понимают не это хорошо знакомое физиологическое ощущение. **В физике силой называется количественная характеристика взаимодействия любых материальных тел.** Сила — величина векторная, она характеризуется величиной, направлением и точкой приложения. В результате действия силы наблюдается

изменение движения тел или их деформация. Эти явления лежат в основе экспериментальных методов измерения силы, например, с помощью пружинного динамометра.

Силы и соответствующие им взаимодействия имеют различную природу. Сейчас физикам известны четыре типа фундаментальных, т. е. не сводимых друг к другу взаимодействий: гравитационное, слабое, электромагнитное и сильное. Здесь они перечислены по мере возрастания силы взаимодействия на малых расстояниях. В таблице приведены их сравнительные соотношения. В обыденной жизни мы наблюдаем проявления лишь двух видов сил: гравитационных и электромагнитных. Слабые и сильные взаимодействия проявляются только в микромире при взаимодействии элементарных частиц.

### Сравнительные соотношения силы фундаментальных взаимодействий (на малых расстояниях)

Тип взаимодействия	Источник силы	Относительная величина	Радиус действия
Гравитационное	Масса	1	Большой
Слабое	Элементарные частицы	$10^{27}$	Малый
Электромагнитное	Электрически заряженные частицы	$10^{38}$	Большой
Сильное (ядерное)	Частицы, входящие в состав ядер (протоны, нейтроны и др.)	$10^{40}$	Малый

В основе классической динамики лежат три закона, которые сформулировал в 1687 г. великий английский физик И. Ньютон (1643—1727).

#### 2.2.1. Первый закон Ньютона

*Всякое тело сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения до тех пор, пока на него не действуют силы или пока равнодействующая всех сил равна нулю:*

$$\vec{a} = 0 \text{ при } \vec{F} = 0.$$

Этот закон называют еще законом *инерции*, поскольку под инерцией как раз и понимают свойство материальных тел сохранять состояние равномерного прямолинейного движения. Количественной характеристикой — мерой инертности тела является физическая величина, называемая *массой*.

Закон инерции имеет существенное значение для живых организмов. Например, при резком торможении тела человека тормозящая сила не прикладывается к внутренним органам, и они продолжают двигаться по инерции, что может вызвать нарушение нормальной деятельности организма. По этой причине летчики и космонавты нередко испытывают чрезмерный приток или отток крови от головного мозга.

Система отсчета, в которой первый закон динамики справедлив, называется *инерциальной*. Если имеется одна инерциальная система отсчета, то первый закон Ньютона будет справедливым и относительно всех других систем, движущихся по отношению к первой равномерно и прямолинейно, т. е. число инерциальных систем отсчета может быть сколь угодно велико. С другой стороны, в системе, которая движется ускоренно относительно инерциальной системы отсчета, первый закон Ньютона выполняться не будет. Такая система называется *неинерциальной*.

Закон инерции отнюдь не является очевидным. Недаром на протяжении многих веков господствовало мнение Аристотеля (384—322 до н. э.) о том, что тело движется лишь до тех пор, пока на него действует сила. Это заблуждение держалось потому, что долгое время люди не осознавали роли такого явления, как сила трения. Открытие закона инерции было одной из первых замечательных побед современного научного мышления, основанного на целенаправленных экспериментах.

В силу принципиальной важности закон инерции выделен в отдельный закон динамики, хотя он и является частным случаем следующего закона.

### 2.2.2. Второй закон Ньютона

*Под действием силы  $\vec{F}$  тело движется с ускорением  $\vec{a}$ , прямо пропорциональным величине этой силы и обратно пропорциональным массе тела  $m$ :*

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}. \quad (2.6)$$

Масса есть величина скалярная. Для ее определения можно, например, использовать выражение (2.6), если сравнить ускорения, приобретаемые телами с неизвестной  $m_x$  и известной  $m_0$

(принятой за эталон) массами под действием одной и той же силы:  $F_1 = m_x a_x$ ;  $F_2 = m_0 a_0$ ;  $F_1 = F_2$ ;  $\frac{m_x}{m_0} = \frac{a_0}{a_x}$ ;  $m_x = m_0 \frac{a_0}{a_x}$ .

Выражение (2.6) не является универсальным, например, им трудно воспользоваться, если сила и масса не постоянны\*. Более общее выражение можно получить, используя дифференциалы.

Учтя, что  $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$ , запишем:  $\vec{F} = m \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d(m\vec{v})}{dt}$ . Стоящее в скобках произведение массы тела на его скорость называется **импульсом** или, иначе, количеством движения (обозначается  $p$ ). С учетом этого второй закон Ньютона можно записать и сформулировать следующим образом:

$$d\vec{p} = \vec{F} dt \quad (2.7)$$

— *изменение импульса тела  $d\vec{p}$  равно импульсу силы  $\vec{F} dt$* .  
Возможен и другой вариант:

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$$

— *сила равна скорости изменения импульса*.

Приведенные выше формулировки второго закона динамики справедливы только для поступательного движения. При вращении тела роль силы играет **момент силы** — векторное произведение силы  $\vec{F}$ , приложенной к телу и радиуса-вектора  $\vec{R}$  точки ее приложения (рис. 2.9):

$$\vec{M} = [\vec{R}, \vec{F}].$$

Как следует из раздела 1.2.4, модуль момента силы равен  $M = RF \sin \alpha$ , а направление определяется правилом правого винта. На рис. 2.9 момент силы направлен вверх по оси вращения.

Для вращательного движения второй закон Ньютона записывается как

$$\vec{\beta} = \frac{\vec{M}}{I}, \quad (2.8)$$

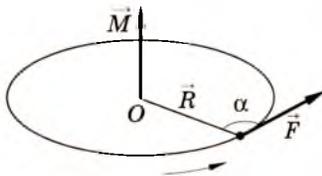


Рис. 2.9

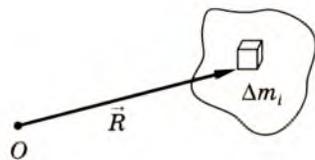
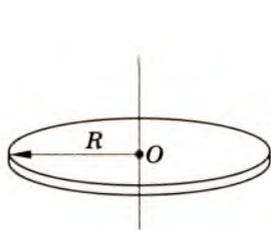


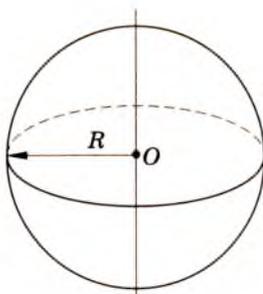
Рис. 2.10

\* Из теории относительности известно, что масса, например, зависит от скорости:  $m = m_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$ , где  $c$  — скорость света.



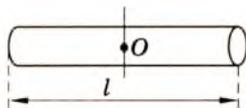
$$I = \frac{1}{2} mR^2$$

Рис. 2.11



$$I = \frac{2}{5} mR^2$$

Рис. 2.12



$$I = \frac{1}{12} ml^2$$

Рис. 2.13

где  $\vec{\beta}$  — угловое ускорение, а  $I$  — скалярная величина, называемая **моментом инерции**. Из сравнения выражений (2.6) и (2.8) видно, что  $I$  играет роль массы, т. е. характеризует инерцию тела при вращательном движении. Для материальной точки момент инерции равен

$$I = mR^2.$$

Для протяженных тел (рис. 2.10) момент инерции можно найти как сумму моментов инерции отдельных бесконечно малых объемов тела массой  $dm$ , т. е. через интеграл:

$$I = \int R^2 dm.$$

Легко видеть, что момент инерции зависит от общей массы тела и ее распределения по объему относительно оси вращения. На рис. 2.11—2.13 приведены моменты инерции некоторых тел простейшей геометрической формы.

### 2.2.3. Третий закон Ньютона

Третий закон динамики отражает то обстоятельство, что любое действие тел друг на друга носит характер взаимодействия. Он гласит, что *при взаимодействии двух тел сила  $\vec{F}_{12}$ , действующая на первое тело со стороны второго, равна по величине и противоположна по направлению силе  $\vec{F}_{21}$ , действующей на второе тело со стороны первого* (рис. 2.14):

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}.$$

Заметим, что эти силы всегда приложены к разным телам, даже если взаимодействующие тела соприкасаются.

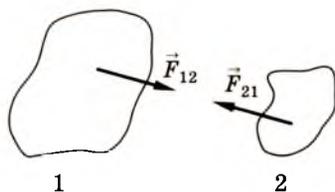


Рис. 2.14

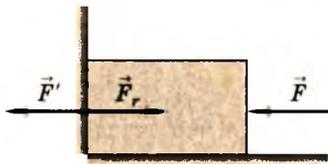


Рис. 2.15

Третий закон Ньютона, в отличие от двух предыдущих, имеет пределы применимости. Он справедлив для покоящихся тел, а также при контактном взаимодействии. Поясним это на следующем примере. Электрический заряд, существующий на Луне, создает в некоторой точке Земли электрическое поле.

Поместим в эту точку другой электрический заряд. На него мгновенно подействует сила со стороны первого, тогда как на первый заряд сила начнет действовать спустя примерно секунду, поскольку электромагнитное поле передается (в данном случае — от второго заряда к первому) с конечной скоростью, равной скорости света. Естественно, что если продолжительность взаимодействия велика по сравнению с временем прохождения света между телами, третий закон динамики справедлив. В частности, он достаточно строго выполняется при всех механических взаимодействиях.

Заметим, что тела, взаимодействующие согласно данному закону, могут оставаться и неподвижными. Так, на груз, лежащий на твердой опоре, действует сила притяжения к Земле, но груз покоится. Другой случай — тело прижимают с силой  $\vec{F}$  к неподвижной стенке (рис. 2.15), и, несмотря на действие силы, оно также остается в покое. Причина в том, что при контакте с неподвижной опорой в ней возникает сила реакции  $\vec{F}_r$ , которая по третьему закону динамики равна по величине и обратна по направлению действующей силе  $\vec{F}$ . Значит в этом случае на тело действуют две силы  $\vec{F}$  и  $\vec{F}_r$ , равнодействующая которых равна нулю\*.

Силы реакции возникают как силы электрического отталкивания между атомами соприкасающихся тел и имеют, следовательно, электромагнитную природу.

### 2.3. ЗАКОН ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ

В 1682 г. Исаак Ньютон в своих знаменитых «Началах» писал: «Тяготение существует ко всем телам вообще и пропорционально массе каждого из них». Далее он установил, что сила тяготения обратно пропорциональна квадрату расстояния между телами и направлена по прямой, соединяющей центры масс этих

\* Обратим внимание, что силы  $\vec{F}$  и  $\vec{F}_r$  приложены к одному телу и потому у них может быть равнодействующая, тогда как сила  $\vec{F}' = -\vec{F}$ , приложена к стенке.

тел. Аналитически закон всемирного тяготения для двух точечных тел с массами  $m_1$  и  $m_2$ , расположенных на расстоянии  $r$  (рис. 2.16), записывается как

$$F = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2},$$

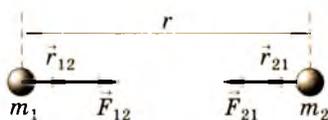


Рис. 2.16

где  $\gamma$  — гравитационная постоянная, в системе СИ равная  $6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Нм}^2/\text{кг}^2$ .

Масса, фигурирующая в законе всемирного тяготения, характеризует гравитационные свойства материи, поэтому она называется *гравитационной* массой. Совсем не очевидно, что она тождественна *инертной* массе, рассмотренной в предыдущем разделе. В то же время многочисленными опытами, погрешность которых не превышает  $10^{-8}\%$ , установлено, что гравитационная и инертная массы эквивалентны друг другу, поэтому часто употребляется просто термин «масса».

С законом всемирного тяготения тесно связано широко употребляемое понятие «вес тела». Однако вес тела и сила его притяжения к Земле — не всегда одно и то же. Например, при прыжке с вышки человек испытывает состояние невесомости, тогда как сила тяготения существует всегда и не зависит от того, движется человек или покоится. **Весом тела принято считать силу, с которой оно действует на опору.** По третьему закону Ньютона вес тела  $P$  численно равен силе реакции опоры:  $P = F_r$ . У человека с весом связано физиологическое ощущение тяжести, о которой он судит по действию жидкости, заполняющей полукруглые каналы внутреннего уха, на окончания нервных клеток (см. раздел 5.1.4).

Разберем понятие веса и невесомости на примере тела, помещенного в лифт (рис. 2.17). С точки зрения стороннего наблюдателя, находящегося в инерциальной системе отсчета, например на лестничной площадке, на тело действует сила тяготения  $F_T$  и сила реакции  $F_r$ . В состоянии покоя (рис. 2.17, а) эти силы уравновешивают друг друга:  $F_T = F_r$ , и тогда вес тела равен силе притяжения к Земле:  $P = F_T$ .

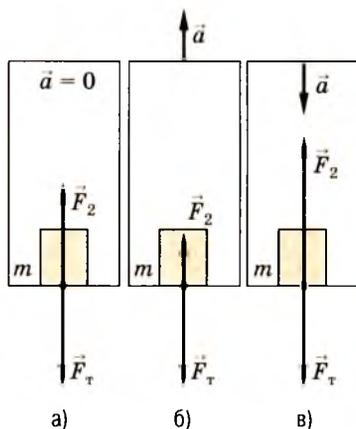


Рис. 2.17

Если же лифт начнет двигаться вниз с ускорением  $a$  (рис. 2.17, б), то по второму закону Ньютона равнодействующая всех действующих на тело сил ( $F'$ ) равна произведению массы тела на его ускорение, т. е.  $F' = ma$ . С другой стороны,  $F' = F_T - F_r$ , откуда

$$F_r = F_T - ma. \quad (2.9)$$

Так как по определению сила реакции опоры численно равна весу тела, то в этом случае вес меньше силы тяготения на величину  $ma$ . Если ускорение будет таким, что  $ma = F_T$ , то сила реакции опоры, а следовательно, и вес тела будут равны нулю. В этом состоянии человек физиологически не ощущает действия силы тяготения — наступает невесомость. Видно, что состояние невесомости возникает при свободном падении тела.

Ускорение свободного падения  $g$  можно найти, учтя, что  $F_T = \gamma \frac{mM_3}{R^2} = mg$ , откуда

$$g = \gamma \frac{M_3}{R^2},$$

где  $M_3$  — масса Земли, а  $R$  — расстояние от падающего тела до ее центра.

Таким образом, ускорение свободного падения тела не зависит от его собственной массы и для любой фиксированной точки  $g$  есть величина постоянная.

Для покоящегося тела, когда вес равен силе тяжести, можно записать, что

$$P = \gamma \frac{M_3}{R^2} m = mg^*.$$

Космический корабль-спутник при выключенных двигателях находится под действием только силы всемирного тяготения, т. е. движется с ускорением свободного падения, поэтому космонавт, подобно человеку, прыгающему с вышки, испытывает аналогичное состояние невесомости.

Наконец, если наш лифт движется с ускорением, направленным вертикально вверх (рис. 2.17, в), вес тела будет больше силы тяготения на величину  $ma$ :  $F_r - F_T = ma$ ;  $F_r = P = F_T + ma$ . Реактивные самолеты и ракеты стартуют с большими ускорения-

---

\* Строго говоря, даже в состоянии покоя вес тела не равен силе тяготения, поскольку из-за вращения Земли вес тела на ее поверхности имеет центростремительное ускорение  $a_n = v^2/r = \omega^2 r$  (где  $r$  — радиус параллели, на которой находится тело). Однако изменение веса тела за счет вращения Земли незначительно.

ми, поэтому пилоты и космонавты испытывают значительные перегрузки. Так, при подъеме с ускорением  $a = g$  вес тела удваивается, при  $a = 2g$  — утраивается и т. д. В лабораторных условиях многократное увеличение веса достигается с помощью центрифуг, в которых тела вращаются с большими центростремительными ускорениями.

Влияние ускорения на вес тела можно рассмотреть и с точки зрения наблюдателя, стоящего в лифте, т. е. находящегося в неинерциальной системе отсчета. Такой наблюдатель покоится относительно лифта, поэтому не обнаруживает воздействия, оказываемого на систему отсчета. Изменение веса он ощущает как результат действия некоторой силы, называемой *силой инерции*  $F_{и}$ . Она направлена в сторону, противоположную ускорению системы отсчета и численно равна произведению массы тела на это ускорение:

$$\vec{F}_{и} = -m\vec{a}.$$

Вес тела наблюдателя, находящегося в лифте, можно записать в виде суммы силы тяготения и силы инерции:  $P = F_{\tau} - ma$ . Видно, что это выражение фактически совпадает с формулой (2.9), т. е., как и следовало ожидать, вес тела не зависит от места нахождения наблюдателя. В повседневной жизни человек часто испытывает действие сил инерции — при подъеме и спуске в лифте, при ускорении и торможении автомобиля и т. п.

В отличие от обычных сил, для сил инерции невозможно указать, действием каких материальных тел они обусловлены. В связи с этим их иногда называют «фиктивными».

## 2.4. ПРИМЕНЕНИЕ ЗАКОНОВ ДИНАМИКИ К АНАЛИЗУ ПОЛЕТА ИСЗ

Как известно, дальность полета горизонтально брошенного тела тем больше, чем выше скорость полета. Еще в 1660 г. И. Ньютон показал, что при увеличении начальной скорости полета можно достичь того, что брошенное тело уже не упадет на Землю, а будет двигаться вокруг нее по окружности. Смысл рассуждений Ньютона отражает рис. 2.18. Скорость, которую необходимо сообщить телу, чтобы оно стало двигаться по круговой орбите вокруг Земли, назы-

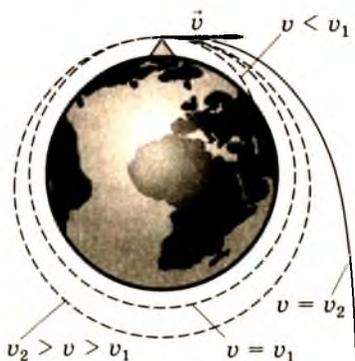


Рис. 2.18

вают *первой космической скоростью*. Вычислим значение этой скорости следующим образом. Допустим, что тело под действием силы тяжести уже совершает движение по окружности вокруг Земли. По второму закону Ньютона  $F_T = ma$ . Так как

$$F_T = \gamma \frac{mM_3}{R^2}, \quad a = \frac{v^2}{R}, \quad \text{то}$$

$$v_1 = \sqrt{\gamma \frac{M_3}{R}}. \quad (2.10)$$

Численно она равна  $8 \cdot 10^3$  м/с.

При дальнейшем увеличении начальной скорости тела будут двигаться по все более вытянутым эллиптическим орбитам. А при скорости  $v_2 = 11 \cdot 10^3$  м/с тела способны преодолеть силу земного тяготения и по параболической траектории покинуть Землю. Такая скорость называется *второй космической скоростью*. Подробнее о ней будет сказано в следующем разделе.

## 2.5. ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ

При всем разнообразии и сложности процессов, протекающих в природе, существуют определенные физические величины, которые остаются постоянными, сохраняются при любых превращениях. В настоящее время физикам известно несколько законов сохранения. Некоторые из них были установлены давно. Еще М. В. Ломоносов (1711—1765), например, высказал мысль о сохранении движения следующим образом: «Все изменения, случающиеся в природе, происходят так, что если что-либо прибавится к чему-либо, то столько же отнимется от чего-либо другого... Так как этот закон всеобщ, то он простирается также на правила движения, и тело, побуждающее своим толчком другое к движению, столько же теряет своего движения, сколько сообщает другому, движимому им».

Хотя законы сохранения во многих случаях не дают новой информации о явлениях и процессах, они занимают в физике очень важное место. Дело в том, что законы сохранения не зависят ни от характера движения тел, ни от действующих на них сил, поэтому на их основе можно делать самые общие и существенные выводы; например, из закона сохранения энергии следует важный вывод о невозможности создания вечного двигателя и др.

### 2.5.1. Закон сохранения импульса

Согласно второму закону Ньютона (см. формулу 2.7), импульс отдельного тела может меняться под действием импульса силы:  $d\vec{p} = \vec{F}dt$ . Но рассмотрим замкнутую систему тел, т. е. та-

кую, в которой действуют только внутренние силы — созданные телами, входящими в данную систему и никакими другими. На рис. 2.19 представлена замкнутая система, состоящая из двух тел. Импульс такой системы равен векторной сумме импульсов обоих тел:  $\vec{p}_c = \vec{p}_1 + \vec{p}_2$  или  $d\vec{p}_c = d\vec{p}_1 + d\vec{p}_2$ . Поскольку  $d\vec{p} = \vec{F}dt$ , то  $d\vec{p}_c = \vec{F}_{12}dt + \vec{F}_{21}dt$ . По третьему закону Ньютона,  $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$ , поэтому  $d\vec{p}_c = \vec{F}_{12}dt - \vec{F}_{21}dt = 0$ , откуда

$$\vec{p}_c = \text{const.}$$

Теперь можно дать следующую формулировку закона сохранения импульса: **вектор импульса замкнутой системы тел есть величина постоянная.**

Закон сохранения импульса лежит в основе реактивного движения. В ракете постепенно сгорает топливо, а газообразные продукты горения с высокой скоростью истекают через сопло назад (рис. 2.20). За счет истечения газов масса ракеты за единицу времени уменьшается на величину  $\mu$ . Пусть в момент времени  $t$  ракета имела массу  $M$  и скорость относительно Земли  $\vec{v}$ . Через некоторый промежуток времени  $dt$  масса ракеты составит  $M - \mu dt$ , а скорость будет равна  $\vec{v} + d\vec{v}$ . Если скорость истечения газов относительно ракеты равна  $\vec{v}_2$ , то относительно Земли она составит  $\vec{v}_2 + \vec{v}$ . В момент времени  $t$  суммарный импульс системы ракета—газы составлял  $M\vec{v}$ , а в момент  $t + dt$  —  $(M - \mu dt) \cdot (\vec{v} + d\vec{v}) + \mu dt(\vec{v}_2 + \vec{v})$ . Система ракета—газы замкнута, поэтому полный импульс будет сохраняться, т. е.  $M\vec{v} = (M - \mu dt) \cdot (\vec{v} + d\vec{v}) + \mu dt(\vec{v}_2 + \vec{v})$ , откуда

$$M \frac{d\vec{v}}{dt} = -\mu \vec{v}_2. \quad (2.11)$$

Левая часть этого уравнения — произведение массы ракеты на ее ускорение. По второму закону Ньютона эта величина равна действующей на ракету силе, поэтому  $-\mu \vec{v}_2 = \vec{F}_p$  называют **реактивной силой**. Знак «минус» показывает, что реактивная сила противоположна направлению скорости истечения газов.

Из (2.11) следует, что для достижения высоких скоростей нужно затратить большое количество

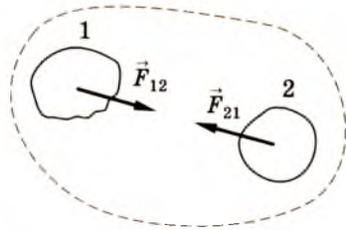


Рис. 2.19

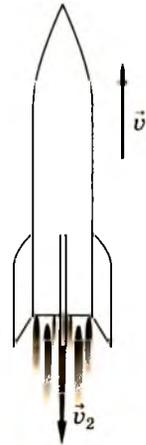


Рис. 2.20

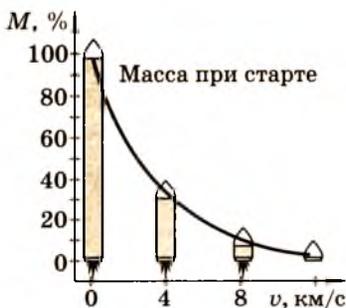


Рис. 2.21

топлива. На рис. 2.21 показано, как меняется масса ракеты при достижении ею второй космической скорости. При полете на Луну, например, топливо составляет 90% начальной массы ракеты.

Реактивное движение имеет место и в живой природе. В частности, своеобразным реактивным двигателем является медуза — сокращаясь, она выбрасывает струю воды и получает некоторый импульс в противоположном направлении.

Движение медузы также описывается формулой (2.11).

### 2.5.2. Закон сохранения момента импульса

В замкнутой системе сохраняется не только импульс, но и величина, называемая *моментом импульса*, или, иначе, — моментом количества движения:

$$\vec{K} = [\vec{R}, \vec{p}].$$

Для материальной точки, вращающейся по окружности радиусом  $R$  с линейной скоростью  $\vec{v}$  (рис. 2.22), импульс  $\vec{p} = m\vec{v}$  и  $\vec{p} \perp \vec{R}$ , поэтому момент импульса равен

$$K = Rmv.$$

Убедимся, что закон сохранения момента импульса непосредственно вытекает из второго закона Ньютона для вращательного движения (см. раздел 2.2.2)

$$I\vec{\beta} = \vec{M}. \quad (2.12)$$

Применительно к рис. 2.22  $I = mR^2$ ,  $\vec{\beta} = \frac{d\omega}{dt}$ . Тогда выражение (2.12) можно представить в виде

$$\frac{d}{dt}(mR^2\vec{\omega}) = \vec{M}.$$

Так как  $\omega R = v$ , а  $m\vec{v} = \vec{p}$ , то  $\frac{d[\vec{R}\vec{p}]}{dt} = \vec{M}$ , т. е.

$$\frac{d\vec{K}}{dt} = \vec{M}.$$

Если момент внешних сил  $\vec{M} = 0$ , то момент импульса тела есть величина постоянная.

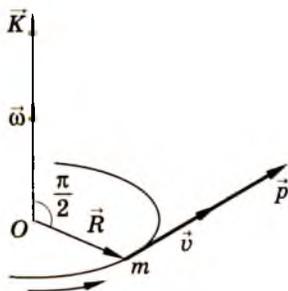


Рис. 2.22

Еще до Ньютона немецкий астроном И. Кеплер (1571—1630) путем тщательных наблюдений установил ряд законов движения планет. Один из них звучал так: планеты движутся вокруг Солнца по эллиптическим орбитам таким образом, что за равные промежутки времени их радиусы-векторы описывают («ометают») равные площади. В дальнейшем же стало ясно, что этот довольно сложный закон есть простое следствие закона сохранения момента импульса. На рис. 2.23 планета  $\Pi$  проходит участки  $A—B$  и  $A'—B'$  за одинаковое время, так что площади заштрихованных секторов равны.

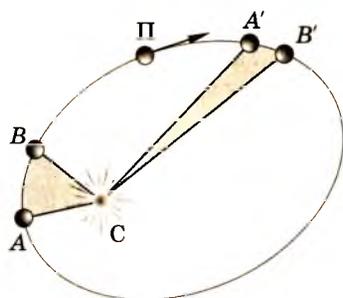


Рис. 2.23

### 2.5.3. Закон сохранения энергии

Окружающий нас мир существует в движении. Общей количественной мерой всех видов движения (материи) служит физическая величина, называемая *энергией*. Поэтому закон сохранения энергии — один из самых фундаментальных законов, упреждающий всеми явлениями и процессами в природе.

Имеется очень много форм движения, например, простое механическое перемещение тел, внутреннее движение молекул, распространение электромагнитных волн и т. д. Каждой форме движения соответствует определенный вид энергии (механическая, внутренняя, электромагнитная). Говорят также, что *энергия есть функция состояния*. Это означает, что всякому состоянию тела или системы тел соответствует определенная величина энергии. Изменение состояний материальных объектов и переход одного вида движения в другой сопровождается непрерывным превращением форм энергии. Например, в живых организмах можно наблюдать следующие ее превращения.

Химическая энергия  $\rightarrow$  механическая энергия (работа мышц, жгутиков бактерий, ресничек инфузорий, передвижение лейкоцитов в крови, кишечное всасывание и др.).

Химическая энергия  $\rightarrow$  электрическая энергия (в нервных клетках и у некоторых рыб).

Химическая энергия  $\rightarrow$  световая энергия (у светящихся организмов).

Световая энергия  $\rightarrow$  химическая энергия (при усвоении растениями углекислого газа).

Закон сохранения энергии утверждает, что *полная энергия замкнутой системы постоянна*.

Рассмотрим подробнее вопрос о механической энергии. С механической энергией тесно связано понятие **работы**. Пусть тело массой  $m$  движется прямолинейно под действием силы  $F$  с ускорением  $a = \frac{F}{m}$ . При этом сила  $F$  будем совершать работу, которую на бесконечно малом участке пути можно определить как  $dA = FdS = madS = m \frac{dv}{dt} v dt = mv dv$ . Полная работа за время, в течение которого скорость тела изменится от  $v_1$  до  $v_2$ , определяется выражением

$$A = \int_{v_1}^{v_2} mv dv = \frac{mv^2}{2} \Big|_{v_1}^{v_2} = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}. \quad (2.13)$$

Величина  $W = \frac{mv^2}{2}$  называется **кинетической энергией**. Кинетической энергией обладают только движущиеся тела. Из (2.13) следует, что **работа, совершенная над телом, равна изменению его энергии**.

Это положение справедливо не только для кинетической энергии, но и для **потенциальной**. Познакомимся с потенциальной энергией на следующем примере. Пусть тело массой  $m$  под

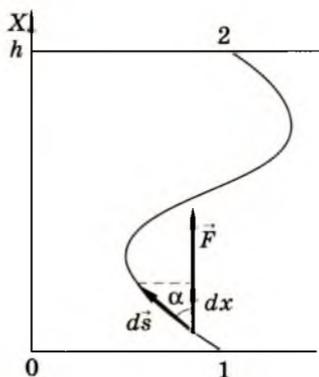


Рис. 2.24

действием силы, равной весу тела, поднимается вверх в поле сил земного тяготения (рис. 2.24) с постоянной скоростью ( $v = \text{const}$ ) на высоту  $h$  по траектории произвольной формы. Сила  $F$  совершает работу, которая подсчитывается, как скалярное произведение:  $dA = (\vec{F}_1, d\vec{s}) = FdS \cos \alpha = Fdx$ .

$$A = \int_0^h F dx = \int_0^h mg dx = mgx \Big|_0^h = mgh - 0, \\ A = mgh. \quad (2.14)$$

Видно, что в этом случае работа не зависит от формы траектории, а определяется только ее начальной и конечной точками. Силы, работа которых

не зависит от формы пути, по которому она совершается, называются **потенциальными**. Примером потенциальных сил могут служить силы гравитации, силы упругости, силы электростатического взаимодействия\*. Работа потенциальных сил равна из-

\* Пример сил, не являющихся потенциальными, — силы трения. Легко убедиться, что работа этих сил зависит от формы пути, на котором она совершается.

менению потенциальной энергии тела:  $A = U_2 - U_1$ . Тогда для приведенного примера с учетом (2.14) потенциальная энергия определяется как

$$U = mgh. \quad (2.15)$$

Аналогично можно найти потенциальную энергию деформированной пружины (рис. 2.25). Сила, необходимая для деформации пружины, пропорциональна величине смещения:  $F = kx$ . Работа, совершаемая при растяжении пружины, равна  $A = \int_{x_1}^{x_2} kx dx = \frac{kx_2^2}{2} - \frac{kx_1^2}{2}$ . Следовательно, потенциальная энергия деформированной пружины определяется выражением

$$U = \frac{kx^2}{2}. \quad (2.16)$$

Легко убедиться, что потенциальная энергия всегда определяется с точностью до некоторой постоянной, поскольку при отсчете координаты положение нулевой точки можно выбрать произвольно. Например, потенциальную энергию тела можно определять не только относительно поверхности Земли, но и относительно любой другой точки, поэтому выражения (2.15) и (2.16)

правильнее переписать в виде  $U = mgh + \text{const}$  и  $U = \frac{kx^2}{2} + \text{const}$ .

Наличие постоянного слагаемого в выражениях для потенциальной энергии связано с тем, что она является энергией взаимодействия тел (или отдельных частей тела), а значит, зависит от характера распределения сил в пространстве и взаимного расположения тел.

Потенциальную энергию взаимодействия тел удобно представлять графически. Зависимость потенциальной энергии от координаты называют потенциальной кривой, которая дает подробную информацию о характере взаимодействия. Пусть тела  $A$  и  $B$  взаимодействуют так, что график  $U = f(x)$  имеет вид, изображенный на рис. 2.26. Для нас сейчас не существенно, по-

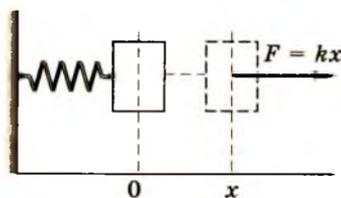


Рис. 2.25

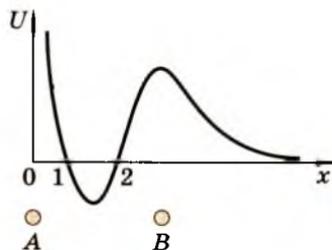


Рис. 2.26

чему потенциальная кривая имеет именно такую форму. На практике встречаются самые различные зависимости  $U(x)$ , в том числе и подобные 2.26. При построении потенциальных кривых систему отсчета обычно связывают с одним из взаимодействующих тел (в данном случае — с телом  $A$ ). За нулевую принята та энергия, которой обладают тела  $A$  и  $B$ , удаленные бесконечно далеко друг от друга ( $U \rightarrow 0$  при  $x \rightarrow \infty$ ). Часть кривой  $U(x)$  ниже оси  $X$  (в области 1—2) характеризуется минимумом потенциальной энергии и называется **потенциальной ямой**, а часть выше оси  $X$  (в областях 0—1 и 2— $\infty$ ) — **потенциальным барьером**. Если тело  $B$  находится в потенциальной яме, то для его «извлечения» оттуда необходимо сообщить ему дополнительную энергию, т. е. совершить над телом работу. При отсутствии же внешнего воздействия тело остается на дне потенциальной ямы — в устойчивом равновесии.

По виду кривой  $U = f(x)$  можно определить направление действующей силы. При совершении телом работы его потенциальная энергия уменьшается, что записывается как  $dA = -dU$ . Поскольку  $dA = F_x dx$ , то  $F_x = -\frac{dU}{dx}$  и, следовательно, сила действует в направлении уменьшения потенциальной энергии. Например, слева от максимума на рис. 2.26 тело будет скатываться в потенциальную яму, а справа — удаляться в бесконечность.

В общем случае тела могут обладать и кинетической и потенциальной энергией. Величина  $E = W + U$  называется **полной механической энергией**. На примере падения тела, качания маятника и т. п. легко убедиться, что кинетическая энергия переходит в потенциальную и наоборот. **В замкнутой системе при отсутствии трения полная механическая энергия остается постоянной.** В этом состоит **закон сохранения механической энергии**, справедливость которого доказана всем развитием науки и техники.

Воспользуемся этим законом для определения величины второй космической скорости. Землю вместе с космической ракетой (рис. 2.27) можно считать замкнутой системой, в которой изменение полной механической энергии  $\Delta E = \Delta W + \Delta U$  равно

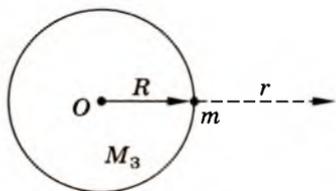


Рис. 2.27

нулю. При полете ракеты с поверхности Земли ( $r = R$ ) на расстояние  $r = \infty$  изменение потенциальной энергии равно работе по перемещению ракеты в поле сил тяготения из точки  $r = R$  до  $r = \infty$ , т. е.  $\Delta U = -\int_R^{\infty} \gamma \frac{mM_3}{r^2} dr = -\gamma \frac{mM_3}{R}$ . Кинетическая энергия при

этом изменится от нуля до величины  $W = \frac{mv^2}{2}$ , т. е.  $\Delta W = \frac{mv^2}{2}$ ,

следовательно,  $\frac{mv^2}{2} - \gamma \frac{mM_3}{R} = 0$  и

$$v_2 = \sqrt{\frac{2\gamma M_3}{R}}.$$

Таким образом, с учетом 2.10,  $v_2 = \sqrt{2} v_1$  или, численно — около 11 км/с.

Для полетов за пределы Солнечной системы потребуется преодолеть притяжение Солнца, поэтому третья космическая скорость будет выше  $v_2$ . Она равна ~40 км/с. Для того чтобы покинуть нашу Галактику, нужно достичь четвертой космической скорости  $v_4 = 290$  км/с, поэтому в Галактике нет объектов, скорости которых превышали бы эту величину. Исключение составляют элементарные частицы, которые являются «жителями» всей Вселенной.

Если между телами действуют силы трения, то механическая энергия системы не остается постоянной, хотя при этом, конечно, не исчезает. Она переходит в эквивалентных количествах в другие виды, т. е. выполняется более общий закон сохранения энергии.

Согласно теории относительности, полная энергия тела пропорциональна его массе:

$$E = mc^2, \quad (2.17)$$

где  $c$  — скорость света в вакууме. Отсюда следует, что любые материальные объекты обладают и энергией и массой, которые пропорциональны друг другу. При увеличении энергии тела соответственно возрастает его масса и наоборот. Воспользовавшись формулой (2.17), легко убедиться, что в простом булыжнике массой 1 кг содержится энергии больше, чем ее дают все электростанции мира, однако использовать эту энергию в полной мере не позволяет закон сохранения тяжелых частиц.

#### 2.5.4. Закон сохранения тяжелых частиц

Тяжелыми частицами называются протоны и нейтроны, из которых состоят ядра всех атомов. Элементарные частицы, о которых подробнее сказано в седьмой главе, претерпевают различные превращения, но общее число тяжелых частиц во всех случаях остается неизменным. Это означает, что общая масса ядер во всех превращениях не может существенно измениться, а следовательно, не может существенно измениться (т. е. выделиться в пространство) и полная энергия, содержащаяся в ядрах. Та-

ким образом, эта гигантская энергия оказывается связанной. Лишь в особых случаях часть ее все же освобождается, например, при делении тяжелых ядер (уран, торий и др.) или при синтезе более тяжелых ядер (скажем, гелия из водорода), когда масса конечных продуктов оказывается несколько меньше массы исходных продуктов. Обе эти возможности получения энергии используются на практике. Более подробно вопрос о внутренней энергии обсуждается в разделе 7.3.

## 2.6. РЕЛЯТИВИСТСКАЯ МЕХАНИКА

### 2.6.1. «Здравый смысл» и действительность

Почти за сто лет существования теории относительности выросло несколько поколений людей, для которых ее создание стало уже далекой историей, но и до сих пор эта теория остается трудной для понимания не только широких масс, но и физиков. Причина прежде всего в том, что люди привыкли в своих представлениях о материальном мире опираться на здравый смысл, который в свою очередь является итогом повседневного «бытового» опыта. Физика оказалась первой наукой, в которой «здравый смысл» перестал быть надежной опорой. Как сказал по этому поводу известный ученый Бертран Рассел, «очевидность — постоянный враг точности». Например, в свое время Аристотель видел, что колесница движется с некоторой постоянной скоростью, пока ее тянет лошадь, а лодка плывет лишь тогда, когда гребут гребцы или парус надут ветром. Опираясь на здравый смысл, Аристотель сделал вывод, что постоянное движение тела возможно лишь при действии на него силы, а в отсутствии силы движения нет. Аристотель ошибся, потому что при простом, непосредственном наблюдении не смог правильно оценить воздействие сил трения, тормозящих движение тела по инерции. Ошибку исправил Галилей, проведя специально организованные опыты и тем самым получив новую информацию сверх той, что могли дать здравый смысл и простое наблюдение.

Наши повседневные представления о мире получены с помощью органов чувств, возможности которых весьма ограничены. Так, расстояния и размеры тел, доступные в настоящее время для изучения, лежат в пределах  $10^{-13}$ — $10^{20}$  м, тогда как размеры объектов, которые человек воспринимает непосредственно, составляют ничтожную долю этого интервала — примерно  $10^{-4}$ — $10^6$  м. Скорости этих объектов также чрезвычайно малы по сравнению с максимально возможными. Лишь совершенствуя приборы, проводя все более точные и целенаправленные опыты, ученые

все глубже проникают в тайны природы, открывая новые явления и законы. При этом для понимания многих процессов человеку, являющемуся частью природы, иногда требуется взглянуть на нее со стороны. Для пояснения воспользуемся примером из книги К. Дьюрелла «Азбука теории относительности».

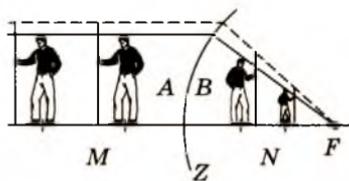


Рис. 2.28

Допустим, что мир разделен на две части  $M$  и  $N$  сферическим зеркалом  $Z$  (рис. 2.28). Каждому предмету в мире  $M$  соответствует изображение в мире  $N$ . Допустим, что изображения так же реальны, как и сами предметы, но все, происходящее с предметами, соответственно сказывается на изображениях. Если человек  $A$  стоит вплотную к зеркалу, то его изображение  $B$  ему идентично. В частности, измерив свой рост с помощью длинных линеек,  $A$  и  $B$  получают одинаковые результаты. Если теперь  $A$  отступит на шаг, то увидит, что  $B$  отодвинулся гораздо меньше, да и ростом стал ниже. Но для  $B$  идентичность полностью сохранится, поскольку его линейка станет короче. Если  $A$  начнет удаляться бесконечно далеко, то  $B$ , делая столько же шагов, будет лишь приближаться к фокусу зеркала  $F$ , который и является для него бесконечностью. И нет способа доказать  $B$ , что с ним происходит нечто необычное.

Приведенный пример еще раз свидетельствует, что истина в природе не всегда очевидна. Материальный мир устроен так, что человеку — части этого мира — не только нелегко открывать новые законы, но зачастую не легче и воспринять, усвоить уже открытое. Все сказанное в полной мере относится к теории относительности.

## 2.6.2. Принципы относительности

Известно (см. раздел 2.2), что законы классической механики выполняются относительно инерциальных систем координат. Галилей установил так называемый **принцип относительности**, гласящий, что **законы механики одинаковы во всех инерциальных системах координат**.

Пусть система  $x'y'z'$  движется относительно системы  $xuz$  вдоль оси  $X$  с постоянной скоростью  $v$  (рис. 2.29). Координаты произволь-

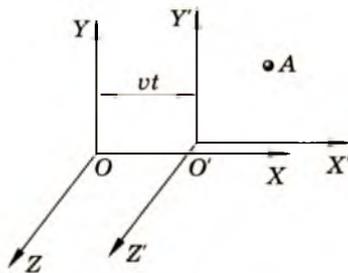


Рис. 2.29

ной точки  $A$  в первой системе связаны с ее же координатами во второй системе соотношениями, которые называются преобразованиями Галилея:

$$\begin{aligned}x' &= x - vt \\y' &= y \\z' &= z \\t' &= t.\end{aligned}\tag{2.18}$$

Тогда скорость и ускорение в движущейся системе выражаются как

$$v' = \frac{dx'}{dt} = \frac{dx}{dt} - v; \quad a' = \frac{dv'}{dt} = \frac{dv}{dt} = a.$$

Видно, что ускорение тела в обеих системах координат — одно и то же, следовательно, второй закон Ньютона выполняется одинаково в любой инерциальной системе отсчета.

Справедлив ли принцип относительности только для механики, или столь же верен и в других областях, например для законов электромагнетизма? Пусть точечный заряд  $q$  покоится относительно проводника, заряженного с линейной плотностью  $\rho$  (рис. 2.30). Для наблюдателя, покоящегося относительно этой системы (рис. 2.30, а), между зарядом и проводником действует только электростатическое притяжение — сила Кулона  $\vec{F}_k$ . Если же наблюдатель движется относительно указанной системы влево,

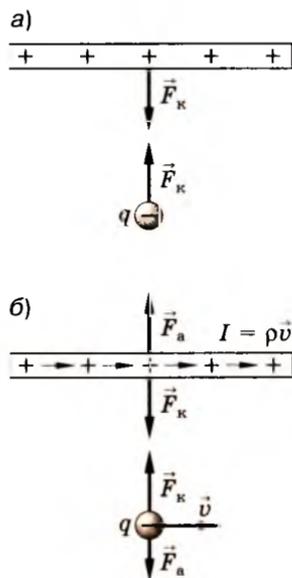


Рис. 2.30

то для него все заряды будут двигаться вправо (рис. 2.30, б), что равносильно протеканию тока в проводнике, а значит, на заряд и проводник действует также и сила Ампера  $F_a$ . Поэтому, казалось бы, принцип относительности для электромагнитных явлений не выполняется. Но это означало бы, что, пользуясь законами электродинамики, можно отличить движущуюся систему координат от неподвижной, т. е. обнаружить «абсолютно покоящуюся» («абсолютно инерциальную») систему отсчета.

Было проведено большое число очень точных опытов, которые показали, что невозможно обнаружить ни абсолютный покой, ни абсолютное движение, что сами эти понятия не имеют физического смысла, и потому принцип относительности должен выполняться для всех физических явлений.

В 1905 г. А. Эйнштейн (1879—1955), обобщив многочисленные исследования, сформулировал два постулата, ставшие основой специальной теории относительности.

1. Законы, управляющие всеми физическими явлениями, одинаковы во всех инерциальных системах отсчета.

2. Скорость распространения света в вакууме есть величина постоянная, одинаковая во всех инерциальных системах отсчета.

Первый постулат является принципом относительности, который Эйнштейн распространил на все физические процессы. Второй постулат основывается на экспериментальном факте, с высокой точностью установленном Майкельсоном (1852—1931).

В той же работе Эйнштейн показал, что законы электродинамики полностью удовлетворяют этим постулатам и не требуют никаких изменений, тогда как законы механики следует видоизменить. В частности, масса должна определяться, как  $m = m_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$ , где  $m_0$  — масса покоящегося тела,  $v$  — скорость его движения, а  $c$  — скорость света в вакууме. В настоящее время эта зависимость получила полное экспериментальное подтверждение. Принятие постулатов Эйнштейна привело к радикальному пересмотру устоявшихся представлений о пространстве и времени. Оказалось, что при переходе от неподвижной системы координат к движущейся (рис. 2.29) следует пользоваться не преобразованиями Галилея, а соотношениями, которые называются преобразованиями Лоренца:

$$\begin{aligned} x' &= (x - vt) / \sqrt{1 - v^2/c^2} \\ y' &= y \\ z' &= z \\ t' &= (t - vx/c^2) / \sqrt{1 - v^2/c^2}. \end{aligned} \quad (2.19)$$

Легко видеть, что при малых скоростях ( $v \ll c$ ) эти преобразования полностью идентичны преобразованиям Галилея. Иными словами, новые явления обнаруживаются лишь при очень больших скоростях. Механику больших скоростей называют *релятивистской механикой*. Классическая же механика оказывается первым приближением релятивистской; она остается справедливой для обычных условий.

Рассмотрим некоторые следствия, вытекающие из преобразований Лоренца.

### 2.6.3. Сокращение длины

Пусть в движущейся системе  $x'y'z'$  покоится стержень длиной  $l' = x'_2 - x'_1$ . Будем измерять длину этого стержня в системе  $xuz$ , относительно которой он движется со скоростью  $v$ . Обозна-

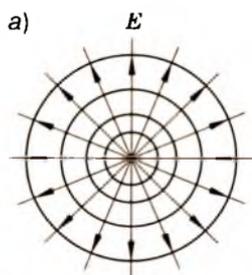


Рис. 2.31

чим искомую длину как  $l = x_2 - x_1$ . В соответствии с преобразованиями Лоренца запишем

$$l' = \frac{x_2 - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - \frac{x_1 - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{x_2 - x_1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}},$$

откуда

$$l = l' \sqrt{1 - v^2/c^2}.$$

Итак, в движущейся системе размеры всех предметов в направлении движения будут в  $\sqrt{1 - v^2/c^2}$  раз меньше. Например, метровый стержень, движущийся со скоростью  $v = 0,8$  с относительно неподвижного наблюдателя, будет иметь для него длину 0,6 м. Этот эффект принято называть Лоренцовым сокращением.

Интересно, что наблюдатель неподвижный относительно «штрихованной» системы отсчета, в свою очередь, будет считать, что движется система  $xyz$  и для него, наоборот,  $l' = l \sqrt{1 - v^2/c^2}$ . Здесь нет никакой

ошибки: обе системы инерциальны, поэтому полностью равноправны.

Для макроскопических объектов еще не достигнуты скорости, при которых сказываются релятивистские эффекты, но опыты с микрочастицами, например с электронами, подтверждают сделанный вывод. В частности, если поле покоящегося электрона сферически симметрично (рис. 2.31, а), то поле электрона, движущегося с достаточно большой скоростью, окажется сжатым в направлении его скорости (рис. 2.31, б).

#### 2.6.4. Замедление времени. Парадокс близнецов

Из четвертого уравнения системы (2.19) следует, что время течет по-разному в различных системах отсчета и при переходе из одной системы в другую его следует преобразовывать так:

$$t' = \frac{t - vx/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}.$$

Подтвердим этот вывод следующим мысленным опытом. Используем в качестве часов устройство, схематически изображенное на рис. 2.32.

В нем луч света движется между двумя параллельными зеркалами, помещенными на некотором расстоянии друг от друга;

каждое отражение луча от зеркала можно сопоставить с колебанием маятника в обычных часах. Пусть часы  $A$  покоятся, а идентичные им часы  $B$  движутся относительно  $A$  со скоростью  $v$ . Обозначим время прохождения света между зеркалами в неподвижных часах  $\tau$ , а в движущихся  $\tau'$ . Из рис. 2.32 видно, что в часах  $A$  свету требуется пройти между зеркалами расстояние  $c\tau$ , а в часах  $B$  — расстояние  $c\tau' > c\tau$ , т. е. интервал времени между отражениями возрастает. Согласно теореме Пифагора

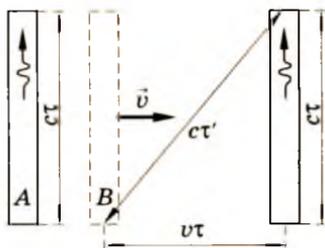


Рис. 2.32

$$(c\tau)^2 + (v\tau)^2 = (c\tau')^2,$$

откуда

$$\tau' = \tau / \sqrt{1 - v^2/c^2}.$$

Иными словами, в движущейся системе отсчета время течет в  $1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$  раз медленнее. Этот эффект не связан со спецификой устройства часов, а является неотъемлемым свойством самого времени. Чтобы убедиться в этом, рядом с оптическими часами можно поставить обычные. Если бы они в движущейся системе шли быстрее, чем оптические, это позволило бы определить абсолютное движение, что нарушает принцип относительности Эйнштейна.

Эффект замедления времени представляет особый интерес для следующего мысленного эксперимента. Допустим, с Земли стартовала ракета со скоростью  $v = 0,9c$ . В ракете улетел один из двух близнецов, которым в момент старта исполнилось 20 лет. Пусть по земному счету для полета до звезды и обратно потребуются 60 лет. Для космонавта же время будет течь в  $1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$  раз медленнее и составит  $\tau' = 18$  лет. Вернувшись 38-летним, он застанет своего брата в возрасте 80 лет. Описанный эффект назвали парадоксом близнецов. Парадокс видится в том, что для космонавта движущейся системой отсчета является Земля, и с его точки зрения время замедляется для оставшегося дома близнеца. Однако в данном случае этот вывод несправедлив, поскольку на самом деле системы неравноправны. Ведь ракета во время полета по крайней мере четырежды получала ускорение, т. е. система отсчета, связанная с ракетой, — неинерциальная. Парадокс близнецов разрешается в общей теории относительности, согласно которой космонавт действительно окажется моложе.

Эффект замедления времени также экспериментально подтверждается в опытах с элементарными частицами.

### 2.6.5. Одновременность событий

Теория относительности потребовала пересмотра и такого, казалось бы, очевидного понятия, как одновременность. Оказалось, что события, одновременные в одной системе отсчета, будут неодновременными в другой, движущейся относительно первой. Допустим, наблюдатель А находится в центре вагона, движущегося по отношению к наблюдателю В со скоростью  $v$  (рис. 2.33). Наблюдатель А включает электрическую лампочку, свет от которой распространяется во все стороны с одинаковой скоростью. С точки зрения наблюдателя А оба луча достигнут зеркал З и З' одновременно. Однако с точки зрения наблюдателя В левый луч достигнет зеркала быстрее, поскольку за время его распространения зеркало З приблизится, а зеркало З' удалится от точки, где включалась лампочка. Таким образом, одновременность событий, пространственно удаленных друг от друга, нарушается. События могут быть достоверно одновременны лишь в том случае, когда они совпадают в пространстве.

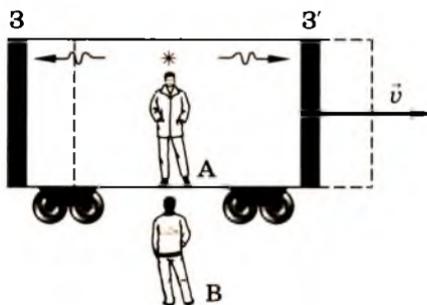


Рис. 2.33

Это явление, как и другие следствия из преобразования Лоренца, оказывается существенным лишь при больших скоростях движения системы отсчета.

### 2.6.6. Релятивистское сложение скоростей

Как известно из нерелятивистской механики, при одинаковом направлении скорости складываются аддитивно, т. е. как простая сумма:

$$v' = v + u.$$

Но легко убедиться, что это выражение несовместимо со вторым постулатом Эйнштейна. Пусть с самолета, летящего со скоростью  $v$ , посылается вперед луч света. Согласно упомянутому постулату, скорость его распространения ( $c$ ) должна быть оди-

наковой относительно любых инерциальных систем отсчета. Применяв к этому случаю правило аддитивного сложения скоростей, получим  $v' = v + c = c?!!$  Следовательно, формулу сложения необходимо уточнить.

Выведем формулу для релятивистского сложения скоростей следующим образом. Скорость тела в неподвижной системе координат запишем как  $u = \frac{x}{t}$ , а в движущейся — как  $v' = \frac{x'}{t}$ . С учетом преобразований Лоренца  $\frac{x'}{t} = \frac{x + vt}{t - vx/c^2} = \frac{x/t + v}{1 + vx/c^2 t}$ , а поскольку  $x/t = u$ , то  $v' = \frac{u + v}{1 - uv/c^2}$ . Как и следовало ожидать, эта формула для релятивистского сложения скоростей переходит в классическую формулу при  $v \ll c$ .

\* \* \*

Рассмотренная выше теория называется *специальной теорией относительности*. Эйнштейн создал также *общую теорию относительности*, которая является современной теорией тяготения. Эта теория выходит за рамки настоящего пособия.

## 2.7. ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

Движение жидкостей и газов подчиняется законам механики Ньютона. Однако жидкие и газообразные тела, в отличие от твердых, не сопротивляются изменению формы, поэтому их движение обладает особенностями. Раздел физики, в котором изучаются процессы движения жидкостей при взаимодействии их с окружающими твердыми телами, называется *гидродинамикой*.

### 2.7.1. Линии и трубки тока. Уравнение непрерывности струи

Реальная жидкость обладает вязкостью, которая проявляется в том, что в движущейся жидкости всегда возникают силы внутреннего трения. Если эти силы малы по сравнению с другими действующими в ней силами (давления, тяжести и т. п.), то жидкость можно считать практически невязкой. Такая жидкость называется идеальной\*.

---

\* При достаточно высоких температурах многие реальные жидкости (вода, эфир, ацетон, спирт и др.) обладают очень малой вязкостью, поэтому их можно рассматривать как идеальные.

Течение, при котором все характеризующие его величины (скорость, плотность жидкости или газа, температура) в данной точке потока остаются без изменения, называется *установившимся* или стационарным. При несоблюдении этого условия течение является *неустановившимся*. Таким образом, в установившемся потоке скорость разных частиц жидкости или газа, поочередно попадающих в некоторую точку пространства, одинакова, что дает возможность представить жидкость как поле (распределение) скоростей. Графически поле скоростей изображают линиями тока (рис. 2.34). Касательные к линиям тока показывают направление вектора скорости, а их густота пропорциональна величине скорости тока. Так, из рис. 2.34 следует, что  $v_2 > v_1$ . Линии тока являются траекториями движения частиц жидкости. Объем жидкости, ограниченный этими линиями, образует трубку тока (заштрихованная часть рис. 2.34). Поскольку скорость частиц направлена вдоль линий тока, частицы жидкости не могут выходить за пределы трубки тока.

Рассмотрим трубку тока (рис. 2.35). Ее сечения  $S_1$  и  $S_2$  различны, поэтому и  $v_1 \neq v_2$ . В гидродинамике важную роль играет *условие неразрывности струи*. Это условие предполагает, что поток жидкости везде остается сплошным тогда, если за единицу времени в трубку тока вошел определенный объем жидкости, то такой же объем за то же время должен из нее выйти, т. е.  $S_1 v_1 = S_2 v_2$ . Данное уравнение, записанное для двух сечений потока несжимаемой жидкости, называется *уравнением непрерывности струи*. В общем случае для идеальной жидкости в стационарных условиях произведение скорости на поперечное сечение трубки тока остается неизменным в любом сечении трубки, поэтому уравнение непрерывности можно записать в виде  $Sv = \text{const}$ .

Из уравнения непрерывности струи следует, что в более узких сечениях трубки тока скорость должна быть больше, чем в широких сечениях, поэтому при переменном сечении трубки тока частицы несжимаемой жидкости движутся с ускорением. Например, в горизонтальной трубке тока это ускорение обусловлено непостоянством давления вдоль оси трубки.

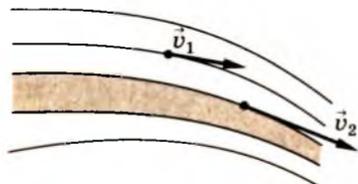


Рис. 2.34

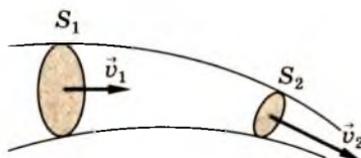


Рис. 2.35

## 2.7.2. Уравнение Бернулли

Возьмем наклонную трубку тока (или реальную трубку) переменного сечения, жидкость в которой движется в направлении слева направо (рис. 2.36). Мысленно выделим область трубки, ограниченную сечениями 1 и 2, в которых скорости течения равны  $v_1$  и  $v_2$  соответственно. Через сечение 1 за время  $dt$  пройдет масса жидкости  $dm$ , занимающая объем  $V = S_1 l_1 = S_1 v_1 dt$ . За это же время через сечение 2 пройдет такая же масса  $dm$ , занимающая такой же объем  $S_2 v_2 dt$ . При стационарном потоке в объеме, заключенном между сечениями 1 и 2, никакие параметры не меняются, несмотря на то, что одни частицы замещаются другими. Поэтому можно исследовать только изменения, происходящие с объемами 11' и 22'. Величина изменения энергии  $dE$  будет равна разности полных энергий вытекающих и втекающих масс жидкости. Учитывая, что полная энергия идеальной несжимаемой жидкости складывается из кинетической и потенциальной энергий, получим

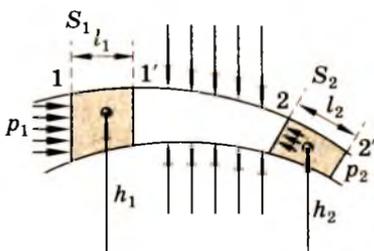


Рис. 2.36

где индексы 1 и 2 относятся к сечениям 1 и 2.

$$dE = \frac{dmv_2^2}{2} + dmgh_2 - \frac{dmv_1^2}{2} - dmgh_1. \quad (2.20)$$

В соответствии с законом сохранения энергии найденная величина должна равняться работе внешних сил по перемещению той же массы  $dm$ , т. е.  $dE = dA$ .

Работа сил, оказывающих давления  $p_1$  и  $p_2$ , равна

$$dA = p_1 S_1 l_1 - p_2 S_2 l_2 = (p_1 - p_2) dV. \quad (2.21)$$

Приравняв выражения (2.20) и (2.21) и учтя, что  $dm = \rho dV$  ( $\rho$  — плотность жидкости), получим

$$\rho \left( \frac{v_1^2}{2} \right) + \rho gh_1 + p_1 = \frac{\rho v_2^2}{2} + \rho gh_2 + p_2.$$

Поскольку сечения  $S_1$  и  $S_2$  выбраны произвольно, можно окончательно записать:

$$\rho \left( \frac{v^2}{2} \right) + \rho gh + p = \text{const}. \quad (2.22)$$

Это соотношение, полученное Д. Бернулли (1700—1782), называется уравнением Бернулли.

Слагаемые, входящие в уравнение Бернулли, имеют размерность и смысл давления. Величину  $\rho(v^2/2)$  называют *динамическим*,  $\rho gh$  — *гидравлическим*,  $p$  — *статическим* давлением. Отсюда можно заключить, что *в установившемся потоке идеальной несжимаемой жидкости полное давление, слагающееся из динамического, гидравлического и статического, постоянно в любом поперечном сечении потока.*

Из уравнений Бернулли и неразрывности струи следует, что в местах сужения трубопровода скорость течения жидкости возрастает, а статическое давление понижается (рис. 2.37).

Уравнение Бернулли является одним из основных законов гидродинамики, имеющим большое прикладное значение. Рассмотрим примеры его практического использования.

**Аэрация почвы.** Рассмотрим вспаханное поле, которое можно представить как систему чередующихся борозд и валов. Пусть ветер дует перпендикулярно к направлению борозд (рис. 2.38). При этом приземной слой представляет собой трубку тока переменного сечения, ограниченную снизу поверхностью земли, а сверху — ближайшей горизонтальной поверхностью, образованной невозмущенными линиями тока. Из уравнений непрерывности струи и (2.22) следует, что давление воздуха над бороздами больше, чем над валами, поскольку  $v_1 < v_2$ . Поэтому в поверхностном слое почвы возникает движение почвенного воздуха, которое направлено от оснований борозд к вершинам валов. В результате этого обеспечивается аэрация (газообмен между почвой и атмосферой). Аэрация обогащает почвенный воздух кислородом, а приземной воздух — углекислотой, создавая тем самым благоприятные условия для развития растений. При сильном ветре скорость воздуха в почве становится настолько интенсивной, что может вызвать размельчение почвенных частиц. Таким образом создается мелкокомковатая структура почвы.

**Гидротаран.** Представим себе, что вода течет со скоростью  $v$  по наклонному трубопроводу (рис. 2.39). В конце трубопровода

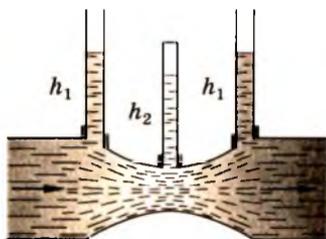


Рис. 2.37

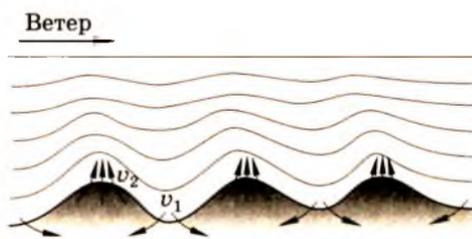


Рис. 2.38

имеется клапан В, который может быстро периодически перекрывать воду. При каждом перекрытии потока динамическое давление в нем падает до нуля, а статическое — возрастает. В результате часть воды по вертикальной трубе Т переходит в водонапорный бак, т. е. поднимается вверх без всяких нагнетательных устройств.

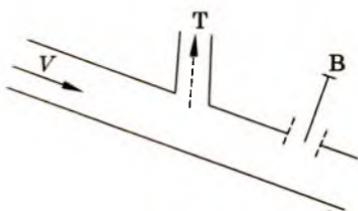


Рис. 2.39

Кроме того, на основании уравнения Бернулли действуют опрыскиватель сельскохозяйственных растений, пульверизатор, ингалятор, карбюратор и ряд других приборов.

### 2.7.3. Течение вязкой жидкости

Различают два режима течения жидкостей и газов: ламинарное (слоистое) и турбулентное (вихревое). В случае ламинарного течения каждый слой потока перемещается, не перемешиваясь с другими слоями. При турбулентном течении происходит образование вихрей и перемешивание различных слоев жидкостей или газов.

Опытным путем было установлено, что важнейшей характеристикой течения является безразмерная величина, называемая числом Рейнольдса ( $Re$ )

$$Re = \rho v L / \eta, \quad (2.23)$$

где  $\rho$  — плотность жидкости (газа),  $v$  — средняя (по сечению трубы) скорость потока,  $L$  — линейный размер, характерный для поперечного сечения (если жидкость течет по круглой трубе диаметром  $d$ , то  $L = d$ ),  $\eta$  — коэффициент вязкости (или коэффициент внутреннего трения).

При достаточно малых значениях  $Re$  наблюдается ламинарное течение. При  $Re > Re_{кр}$  (критическое значение) ламинарное течение переходит в турбулентное. Для гладких круглых труб, например,  $Re_{кр} \approx 2300$ .

Поясним теперь смысл коэффициента  $\eta$ . В разделе 2.7.1 сказано, что в реальных вязких жидкостях действуют силы внутреннего трения. Они являются результатом взаимодействия отдельных слоев и направлены по касательной к этим слоям.

Пусть жидкость движется перпендикулярно оси  $OZ$  (рис. 2.40), а ее скорость  $v = f(z)$ . Изменение скорости в

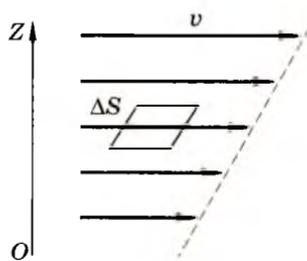


Рис. 2.40

расчете на единицу длины в направлении, перпендикулярном скорости, называется градиентом скорости. Численно он выражается соотношением  $dv/dz$ . Так как при течении вязкой жидкости между ее слоями, движущимися с разной скоростью, возникают силы внутреннего трения, то более быстрая часть увлекает за собой более медленную. По третьему закону Ньютона более медленная часть вызывает при этом торможение более быстрой. Сила внутреннего трения пропорциональна как площади взаимодействия слоев  $\Delta S$ , так и градиенту скорости  $dv/dz$ , а коэффициентом пропорциональности как раз и является  $\eta$ :

$$F_{\text{тр}} = \frac{\eta \Delta S dv}{dz}.$$

Единицей изменения  $\eta$  в системе СИ является паскаль-секунда (Па · с) с размерностью [кг/м · с].

При течении жидкости с небольшим коэффициентом вязкости по широкой смачиваемой трубе силы вязкости проявляются лишь в пограничном слое, прилегающем к стенке трубы. В этом случае скорость течения возрастает от нуля (у стенки) до некоторого определенного значения, одинакового для всего остального сечения.

Но к движению жидкости по весьма узкой (капиллярной) трубке эти рассуждения неприменимы, поскольку пограничный слой заполняет все сечение трубы. В этом случае скорость течения возрастет от нуля до максимального значения у оси трубы, изменяясь по параболическому закону.

Коэффициент вязкости  $\eta$  является важным параметром жидкости. Задача его измерения часто встречается на практике. Например, в медицине необходимо определить вязкость крови, в агрономии — вязкость питательных растворов при гидропонном выращивании растений и т. п. Приборы, служащие для определения  $\eta$ , называются вискозиметрами. Одним из распространенных приборов является вискозиметр Оствальда. В основе его работы лежит формула Пуайзеля.

Французский ученый Пуайзель установил, что объем жидкости, вытекающий при постоянной разности давлений  $\Delta p$  из капиллярной трубки радиусом  $R$  за время  $t$ , определяется соотношением

$$V = \frac{\pi \Delta p R^4 t}{8 \eta l},$$

где  $l$  — длина капиллярной трубки.

В заключение отметим, что течение вязкой жидкости по трубам представляет для биологов и медиков особый интерес, поскольку при исследовании кровообращения гидродинамика позволяет рассматривать сердечно-сосудистую систему человека и животных как замкнутую разветвленную систему трубок переменного сечения.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И УПРАЖНЕНИЯ

1. В этой книге названы только четыре вида взаимодействий. Не слишком ли это просто? Не могли бы вы назвать какие-либо взаимодействия, которые не относятся к этим четырем?

2. Какое значение имеет то обстоятельство, что тепловая электростанция выбрасывает в окружающую среду существенную часть потребляемой химической энергии, которая высвобождается, например при сгорании мазута? Ведь энергия сохраняется и не пропадает. В чем состоит негативный момент выбрасывания части химической энергии в окружающую среду?

3. Зная ваш личный рекорд на стометровке, определите вашу среднюю скорость на этой дистанции. Сравните ее со скоростью лучших спортсменов, которые пробегают 100 м за 9,9 с.

4. Автомобилист начал движение и проехал за 1 минуту 1 км. Имел ли право автоинспектор остановить его за превышение скорости, если скорость в этой зоне ограничивалась 60 км/час?

5. Можно ли определить ускорение как быстроту изменения скорости в пространстве (а не во времени, как это принято), т. е.  $a = dv/dx$ ? Почему эта возможность не используется на практике?

6. Человек находится на краю карусели, радиус которой составляет 5 м. Карусель делает 1 оборот за 10 с. Чему равно среднее за оборот значение модуля его скорости? Чему равна его средняя скорость за время одного оборота?

7. На примере автомобиля, движущегося с постоянной скоростью на прямолинейном участке пути покажите, в чем заключается ошибочность представления Аристотеля о том, что тело движется равномерно и прямолинейно, только если на него действует сила.

8. Почему, когда хотят открыть тяжелую дверь, ее толкают не вблизи петель, а вблизи ручки? Почему дверь открыть легче, если ее толкать перпендикулярно поверхности, а не под углом к ней?

9. Вы находитесь в Северном полушарии. К северу от вас находится область пониженного атмосферного давления. В каком направлении будет дуть ветер?

10. Какой эксперимент показывает, что гравитационная масса пропорциональна инертной? Если бы, например, гравитационная масса была пропорциональной квадрату инертной массы ( $m_{гр} = m_{ин}^2$ ), то какое из двух тел (тяжелое или легкое) первым достигло земли, если их одновременно отпустить с одной высоты?

11. Большинство гор на Земле состоит из оксидов кремния и имеет плотность около  $2500 \text{ кг/м}^3$ . Каким было бы ускорение свободного падения в том случае, если бы вся Земля состояла из этих пород? Радиус Земли принять равным 6400 км.

- 12.** Куда направлена угловая скорость вращающейся стрелки часов?
- 13.** С наклонной плоскости скатываются два цилиндра одинаковой массы и одинаковых размеров. Однако один из них полый, а другой сплошной. Скатятся ли они за одинаковое время? Если нет, то какой окажется быстрее?
- 14.** Известно, что период обращения Луны вокруг Земли равен 27 суткам. Почему же по календарю между полнолуниями проходит 29 суток?
- 15.** В каком положении колеблющегося маятника его скорость максимальна и минимальна?
- 16.** Теннисный мяч ударяется о землю перпендикулярно ее поверхности и отскакивает вверх. Изменится ли его импульс после удара, если считать удар абсолютно упругим?
- 17.** Теннисный мяч вблизи поверхности Земли весит 0,55 Н. Сколько же весит Земля в гравитационном поле теннисного мяча?
- 18.** Почему сидя на вращающемся стуле, не удастся создать вращение, отталкиваясь от обода стула?
- 19.** Почему у вертолетов всегда имеются два винта? Почему вертолет с одним винтом не может летать?
- 20.** Почему гимнаст делая сальто, «группируется», подтягивая руки, ноги и голову ближе к туловищу, а перед приземлением «раскрывается»?
- 21.** Иногда энергию сравнивают с деньгами. В каком смысле возможна такая аналогия?
- 22.** Брусок неподвижно лежит на столе и между ними, естественно, имеется трение. Почему же он не разгоняется под действием этой силы?
- 23.** Приложенная к пружине сила вызывает ее удлинение, а значит — совершает определенную работу. Но пружина при этом не приобретает никакой кинетической энергии. Не нарушается ли в этом случае закон сохранения энергии?
- 24.** Спутник в верхних слоях атмосферы постепенно теряет энергию из-за сопротивления воздуха, и его орбита снижается. Что происходит при этом со скоростью спутника?
- 25.** Двигается ли Земля вокруг Солнца или же Солнце вокруг Земли?
- 26.** При каких условиях преобразования Лоренца сводятся к преобразованиям Галилея?
- 27.** Известно, что вода в водопровод поступает из водонапорной башни, куда ее закачивают насосом. Зачем строить дорогие и громоздкие водонапорные башни? Не лучше ли подавать воду в водопроводную систему сразу насосом?

28. Определить ускорение свободного падения на поверхности Луны. Масса Луны —  $7,3 \cdot 10^{22}$  кг, диаметр —  $3,48 \cdot 10^6$  м.

29. Можно ли определить ускорение тела по величине вектора скорости в некоторый момент времени?

30. Велосипедист движется со скоростью 20 км/ч. Во сколько раз нужно увеличить скорость, чтобы его кинетическая энергия возросла втрое?

31. Определить момент инерции Земли. Масса Земли —  $5,96 \cdot 10^{24}$  кг, радиус —  $6,37 \cdot 10^6$  м. Определить момент инерции Луны.

32. Упругая сила пропорциональна смещению ( $F = kx$ ). В каких единицах выражается  $k$  в системе СИ?

33. Человек массой 60 кг опускается в лифте с ускорением  $2 \text{ м/с}^2$ . Определить его вес.

34. Определить период обращения искусственного спутника Земли, вращающегося по круговой орбите на расстоянии 20000 км от поверхности Земли.

35. Медуза массой 0,2 кг при сокращении выбрасывает 0,05 кг воды со скоростью 1 м/с. Определить скорость, которую приобретает медуза.

36. Во сколько раз увеличится плотность тела, если оно движется со скоростью 0,2 с? Размеры тела в направлении, перпендикулярном направлению движения, не изменяются.

37. С самолета, летящего горизонтально со скоростью 3000 км/ч относительно Земли, пускается ракета со скоростью 3000 км/ч относительно самолета в направлении его движения. Какова скорость ракеты относительно Земли?

38. На сколько процентов увеличится масса электрона, если ему сообщена энергия  $2 \cdot 10^6$  эВ?

39. По полу бежит таракан. Длина его тела 10 мм, центр тяжести находится на высоте 0,25 см от пола. При какой минимальной скорости таракан, споткнувшись, может перевернуться на спину?

40. Мышца ноги, действуя со средней силой 2500 Н, сократилась на 3 см. Какая работа произведена при этом? На сколько увеличился запас механической энергии, если центр тяжести человека массой 50 кг поднялся на высоту 10 см?

41. Саранча массой 2,5 г в прыжке поднимается на высоту 4 м. Направление прыжка такового, что 30% энергии расходуется на подъем, а 70% связано с горизонтальным полетом. Какова кинетическая энергия саранчи в самом начале прыжка?

42. Определить силу сопротивления кровотока в капилляре длиной 0,7 мм и диаметром 8 мкм. Вязкость крови  $\eta$  принять равной  $2 \cdot 10^{-2}$  кг/мс.

## МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ВЕЩЕСТВА

### 3.1. ОБЩИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ СТРОЕНИЯ ВЕЩЕСТВА

Материальные тела, встречающиеся в природе, обладают самыми разнообразными свойствами. Известно, например, что медная проволока, будучи быстро растянутой, охлаждается, а резиновый жгут в этих условиях, наоборот, нагревается. Вольфрам — тяжелый металл — плавится при очень высокой температуре, тогда как ртуть (тоже тяжелый металл) уже при  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  находится в жидком состоянии. Еще более разнообразными и удивительными свойствами (вплоть до мыслительной способности головного мозга) обладают органические вещества. Такое различие физических свойств материалов обусловлено различием их внутреннего строения.

В основе современных представлений о строении вещества лежит *молекулярно-кинетическая теория*, согласно которой вещество имеет дискретную структуру — оно состоит из мельчайших частиц: атомов и молекул. Наиболее простыми из этих частиц являются атомы. Однако хотя по-гречески «атом» означает «неделимый», он совсем не представляет собой предела делимости вещества и не является его мельчайшей частицей. Атомы — это простейшие из частиц, которые еще обладают определенными химическими свойствами (валентностью и т. п.). Составные части атома (ядро и электроны) этими свойствами уже не обладают. О величине атомов можно судить по самому маленькому из них — атому водорода. Он имеет поперечные размеры  $\sim 10^{-10}$  м и массу  $\sim 1,7 \cdot 10^{-27}$  кг.

Вещества, состоящие непосредственно из атомов (например, гелий, аргон, золото, железо), называются *химическими элементами*. В настоящее время открыто (найден в природе и получено искусственно) более 100 элементов, но только 92 из них встречаются в естественном состоянии. Все многообразие веществ обусловлено способностью атомов определенным образом соединяться друг с другом и образовывать *молекулы*. Подобно тому как из немногих букв алфавита составляются десятки ты-

сяч слов, сочетания 92 элементов дают огромное число различных *химических соединений*. Естественно, что подавляющее большинство веществ, встречающихся в природе, состоит из молекул. Некоторые молекулы содержат сотни и тысячи атомов, достигают гигантских (по атомным масштабам) размеров и при увеличении в миллионы раз могут наблюдаться визуально с помощью современных электронных микроскопов.

Даже в твердых веществах, не говоря уж о жидкостях и газах, все атомы и молекулы находятся в непрерывном хаотическом движении. Молекулярно-кинетическая теория не исследует всех реальных свойств атомов и молекул. Она пользуется определенными модельными представлениями, в частности, иногда абстрагируется от реальных сил взаимодействия между атомами и молекулами, рассматривает их как неделимые и неизменяемые частицы и не занимается вопросами их внутреннего строения. Однако хотя в целом молекулярно-кинетическая теория является приближенной, на ее основе удовлетворительно объясняются очень многие свойства материальных тел (теплоемкость, теплопроводность, диффузия и др.).

Идеи атомизма зародились еще в древности — у античных и древнеиндийских философов, других древних мыслителей. Во времена раннего средневековья эти идеи были забыты, и фактически молекулярно-кинематическая теория была создана усилиями многих ученых в XVIII—XIX вв. Среди них в первую очередь следует отметить Р. Майера (1814—1878), Д. Джоуля (1818—1889), Г. Гельмгольца (1821—1894), Р. Клаузиуса (1822—1888). Большие заслуги в разработке этой проблемы принадлежат М. В. Ломоносову (1711—1765).

## 3.2. ДВА МЕТОДА РАССМОТРЕНИЯ ЯВЛЕНИЙ ПРИРОДЫ

Все физические свойства материальных тел и связанные с ними явления могут быть рассмотрены двумя различными методами: *термодинамическим* и *статистическим*. Познакомимся с этими методами на примере газа.

### 3.2.1. Макропараметры газа

Газ, заключенный в каком-либо сосуде, будет характеризоваться объемом  $V$ , массой  $m$ , давлением  $p$  и температурой  $T$ . Эти параметры можно измерить экспериментально и изменить по нашему желанию. Они называются *макропараметрами*, так как характеризуют газ в целом, отвлекаясь от вопросов его внутреннего строения. Макропараметры газа взаимосвязаны и подчиняются определенным соотношениям, которые носят

название *уравнений состояния*. Например, таковыми являются известные законы

Бойля—Мариотта:

$$pV = \text{const} \text{ при } m = \text{const} \text{ и } T = \text{const}, \quad (3.1)$$

Гей-Люссака:

$$V = \alpha V_0 T \text{ при } m = \text{const} \text{ и } p = \text{const} \\ \text{или } V/T = \text{const} \quad (3.2)$$

и Шарля:

$$p = \alpha p_0 T \text{ при } m = \text{const} \text{ и } V = \text{const} \\ \text{или } p/T = \text{const}. \quad (3.3)$$

Параметр  $\alpha$  в уравнении (3.3) называется термическим коэффициентом давления, а в уравнении (3.2) — коэффициентом термического расширения газа. Численно он равен  $1/273,15 \text{ град}^{-1}$  и в достаточно широком интервале температур и давлений остается практически постоянным почти для всех газов. Температура, входящая в уравнения (3.2) и (3.3), измеряется по абсолютной шкале Кельвина, которая связана со шкалой Цельсия соотношением  $T = 1/\alpha + t$ .

Законы Бойля—Мариотта, Гей-Люссака и Шарля являются частными случаями объединенного газового закона Клапейрона—Менделеева

$$pV = \frac{m}{\mu} RT, \quad (3.4)$$

где  $\mu$  — молекулярный вес газа, а  $R$  — универсальная газовая постоянная, равная  $8,31 \text{ кДж/кмоль} \cdot \text{град}$ . Отношение  $m/\mu$  равно числу молей, содержащихся в данной массе газа.

Все упомянутые законы справедливы лишь для газов, объемом молекул которых можно пренебречь. На рис. 3.1 представлена температурная зависимость давления газа при постоянном объеме (изохора). Пунктиром на этом же рисунке изображена зависимость, соответствующая закону Клапейрона—Менделеева (3.4). Видно, что этот закон выполняется не во всей температурной области, причем для одних газов ( $\text{H}_2$ , He и др.) область справедливости (3.4) шире, а для других (пары воды, аммиак и др.) гораздо уже. Газы, которые подчиняются закону Клапейрона—Менделеева, называются *идеальными*. Очевидно, что газов, идеальных в буквальном смысле, не существует, но при высоких температурах и большом разрежении любой газ ведет себя как идеальный.

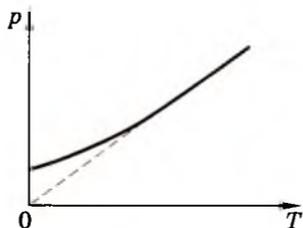


Рис. 3.1

Найдены уравнения состояния, которые отражают свойства реальных газов более полно, чем уравнение Клапейрона—Менделеева. Наиболее простым из них является *уравнение Ван-дер-Ваальса*:

$$\left(p + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = RT, \quad (3.5)$$

где  $a$  и  $b$  — поправки на давление и объем, характерные для каждого газа. Уравнение Ван-дер-Ваальса также имеет свои пределы применимости.

Рассмотрение явлений природы так, как они проявляются внешне (анализ макропараметров вещества), составляет сущность термодинамического метода изучения физических процессов. Уже из этого определения можно сделать вывод о достоинствах и недостатках термодинамического метода. В его основе лежат экспериментально наблюдаемые величины, а законы, которым они подчиняются, носят опытный (эмпирический) характер. *Термодинамический метод* не требует также знания каких-либо свойств атомов или молекул, составляющих тело, поэтому *обладает большой общностью* и позволяет относительно просто решать широкий круг практических вопросов, в том числе и вопросы энергообмена в живых организмах. С другой стороны, *термодинамическим методом нельзя выяснить физический механизм тех или иных явлений*, т. е. нельзя ответить на вопрос «почему?» Например, почему при понижении температуры давление газа уменьшается? Почему при большом разряжении газы можно считать идеальными, а при высоком давлении — нет? Каков физический смысл поправок Ван-дер-Ваальса? и т. д. Используя термодинамический метод, можно ответить только на вопрос «как?» — как протекают те или иные явления.

Статистический метод лишен названных недостатков. В его основе как раз лежит анализ атомно-молекулярного механизма физических явлений, используются определенные представления о свойствах атомов и молекул, о механизме их взаимодействия. Такой подход позволяет с единой точки зрения обосновать уравнения состояния газа, создать теорию теплоемкости, теплопроводности, диффузии и т. п. Более того, статистический метод дает не только строгое обоснование законов термодинамики, но и указывает границы их применимости. Однако статистический метод тоже не лишен некоторых недостатков. Он основывается на определенных модельных представлениях о свойствах атомов и молекул, поэтому выводы, к которым он приводит, справедливы лишь настолько, насколько точно соответствует

выбранная модель свойствам реальных частиц. Кроме того, использование статистического метода часто сталкивается с большими математическими трудностями.

### 3.2.2. Микропараметры газа

При изучении физических явлений статистическим методом рассматриваются микропараметры вещества. Допустим, газ состоит из молекул, которые представляют собой абсолютно твердые, хаотически движущиеся шарики\*. Пусть молекулы не испытывают других взаимодействий, кроме упругого столкновения и не имеют собственного объема (точнее, собственным объемом молекул будем просто пренебрегать). Огромная совокупность молекул, обладающих такими свойствами, составляет идеальный газ\*\*. Каждая молекула идеального газа будет обладать своей массой  $m_i$ , скоростью  $\vec{v}_i$ , энергией  $\epsilon_i$  и др. Эти параметры относятся к отдельным молекулам и называются **микропараметрами**. Некоторые микропараметры ( $\vec{v}_i$ ,  $\epsilon_i$ ) при хаотическом движении молекул в результате их постоянного столкновения друг с другом будут изменяться, принимая самые разнообразные значения, в силу чего они не могут характеризовать газ в целом. На рис. 3.2 схематически изображено изменение скорости некоторой молекулы за определенный промежуток времени. Если просуммировать значения  $\vec{v}_i$  для всех  $N$  молекул, из которых состоит газ в рассматриваемом объеме, и поделить эту сумму на  $N$ , то получится **средняя арифметическая скорость** движения молекул газа  $\bar{v} = (\sum_{i=1}^N \vec{v}_i)/N$ . Эта величина остается микропараметром, но относится уже не к отдельной молекуле, а ко всему газу в целом. Аналогично можно ввести понятие средней кинетической энергии молекул газа

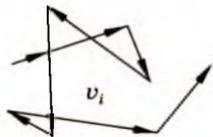


Рис. 3.2

$$\bar{\epsilon} = (\sum_{i=1}^N \epsilon_i)/N = (\sum_{i=1}^N \frac{1}{2} m v_i^2)/N.$$

Если все молекулы газа имеют одинаковую массу, то  $\bar{\epsilon} = \frac{1}{2} m (\sum_{i=1}^N v_i^2)/N$ . Выражение  $\overline{v^2} = \sum_{i=1}^N v_i^2/N$  называется средним квадратом скорости, а величина  $v' = \sqrt{\overline{v^2}}$  — **средней квадра-**

\* Термин «газ» впервые введен в науку в 1640-х гг. голландским ученым Ван-Гельмонтом и в переводе означает «хаос».

\*\*Идеальный газ — такая же физическая абстракция, как и материальная точка, абсолютно твердое тело и т. п.

*тичной скоростью*\*. С учетом этого средняя кинетическая энергия молекул газа

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{2} m \bar{v}^2. \quad (3.6)$$

Как уже отмечалось, в процессе хаотического движения микропараметры отдельной молекулы принимают всевозможные значения, но средние микропараметры при неизменном состоянии газа остаются постоянными. Они меняются лишь при переходе газа из одного состояния в другое, например, при сжатии, нагревании и т. п. и в этом смысле являются такими же объективными характеристиками газа, как и макропараметры. Рассмотрим закономерности, которым подчиняются микропараметры.

### 3.3. СТАТИСТИКА ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

В соответствии с моделью идеального газа любую молекулу можно рассматривать как материальную точку, к которой применимы законы механики. Казалось бы, все свойства газа можно предсказать, если проанализировать движение каждой молекулы, составляющей газ. Математически эту задачу можно представить в виде суммы дифференциальных уравнений, выражающих второй закон Ньютона для каждой молекулы:

$\sum_{i=1}^N m \frac{dv_i}{dt} = \sum_{i=1}^N F_i$ . Однако такой подход в принципе ошибочен. Задача не может быть решена таким способом не только из-за огромных математических трудностей, поскольку пришлось бы мысленно проследить движение каждой молекулы. Огромная совокупность частиц (только в одном кубическом сантиметре газа при нормальных условиях содержится  $\sim 2,7 \cdot 10^{19}$  молекул) выступает в новом качестве — она представляет собой *статистическую систему*, которая подчиняется другим законам, не сводимым к законам механики. В статистической системе проявляются новые свойства, отсутствующие у отдельных молекул. Такая точка зрения возникла еще у древних философов. Например, Тит Лукреций Кар в поэме «О природе вещей» писал, что во Вселенной движется бесчисленное множество атомов, но число типов их ограничено. Вещество состоит из сочетания атомов, которые могут входить в соединение друг с другом лишь ограниченным числом способов. Сами же атомы бесцветны, не имеют ни температуры, ни запаха, ни любых других

---

\* Легко проверить, что средняя квадратичная скорость всегда больше средней арифметической скорости.

свойств, присущих видимым предметам. Лукреций во многом оказался прав. Ниже мы убедимся, что многие свойства макроскопических тел, такие, как температура, давление, теплоемкость и др. являются следствием хаотического движения огромного числа атомов и молекул, составляющих эти тела, т. е. присущи только статистической системе, а не отдельной молекуле.

Воспользуемся статистическими методами для объяснения некоторых физических свойств газов.

### 3.3.1. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории газов

Рассмотрим идеальный газ, помещенный в некоторый сосуд. Несмотря на хаотическое движение молекул, газ в целом будет неподвижен. Это означает, что все направления хаотического движения молекул равновероятны, поэтому можно полагать, что в любом направлении вдоль осей координат (в том числе и перпендикулярно любой стенке сосуда) будет двигаться в среднем  $1/6$  часть всех молекул (рис. 3.3)

$$N_x = \frac{1}{6} N,$$

где  $N$  — полное число молекул в объеме газа.

При хаотическом движении молекулы ударяются о стенки сосуда и упруго отражаются. Допустим, что молекулы движутся со средней квадратичной скоростью  $v'$ . По второму закону Ньютона изменение импульса молекулы при ударе будет равно импульсу силы  $dp = Fdt$ . До удара каждая молекула имеет импульс  $p_1 = mv'$ , а после удара  $p_2 = -mv'$ . Изменение импульса одной молекулы составит  $dp = -2mv'$ . Стенка при этом получит импульс  $2mv'$ . На площадку  $S$  за время  $dt$  может попасть  $1/6$  часть всех молекул,

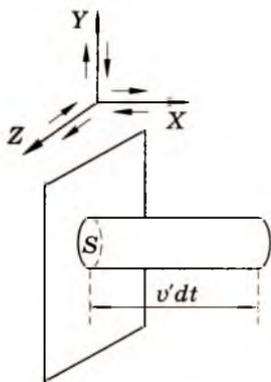


Рис. 3.3

которые находятся от нее на расстоянии, не превышающем  $v'dt$ , т. е. занимают объем цилиндра, выделенного на рис. 3.3. Число таких молекул можно подсчитать следующим образом:  $N_x = 1/6N = 1/6ndV = 1/6nv'dtS$  (где  $n$  — концентрация молекул,  $dV$  — объем цилиндра). Полный импульс, который получит участок стенки площадью  $S$  за время  $dt$ , равен  $dp_n = dpN_x = 2mv'(1/6nv'dtS) = 1/3nm\bar{v}^2dtS = Fdt$ . Отсюда  $F = 1/3nm\bar{v}^2S$ . Поделим обе части на  $S$ . Поскольку  $F/S$  есть давление  $p$ , оказываемое газом на стенку сосуда, находим, что

$$p = \frac{1}{3} n m \bar{v}^2. \quad (3.7)$$

Поскольку величина  $1/2 m \bar{v}^2$  есть средняя кинетическая энергия хаотического движения молекул газа (см. 3.6), выражение (3.7) можно представить в виде

$$p = \frac{2}{3} n \bar{\epsilon}. \quad (3.8)$$

Это соотношение называется основным уравнением молекулярно-кинетической теории газов. Оно вскрывает глубокую и неразрывную связь между микро- и макропараметрами. В частности, опираясь на него, можно уяснить физический смысл давления газа. Давление обусловлено непрерывной бомбардировкой стенок сосуда хаотически движущимися молекулами, в процессе которой они передают стенке определенный импульс. Величина давления определяется средней кинетической энергией поступательного движения молекул. Совершенно очевидно, что давление — это результат коллективного действия огромной совокупности молекул, образующих статистическую систему. Оно не имеет смысла применительно к одной молекуле.

Из основного уравнения молекулярно-кинетической теории газов вытекает ряд важных следствий. Рассмотрим некоторые из них.

### 3.3.2. Теоретическое обоснование газовых законов

В уравнении (3.8) представим концентрацию молекул  $n$  в виде  $n = \frac{N}{V}$  (где  $V$  — объем газа, а  $N$  — число молекул в этом объеме), тогда получим  $p = \frac{2}{3} \frac{N}{V} \bar{\epsilon}$  или

$$pV = \frac{2}{3} N \bar{\epsilon}. \quad (3.9)$$

При условии, что  $\bar{\epsilon} = \text{const}$ , уравнение (3.9) совпадает с законом Бойля—Мариотта ( $pV = \text{const}$ ). Поскольку этот закон выполняется при постоянной температуре, следует ожидать, что средняя кинетическая энергия хаотического движения молекул связана с температурой газа. Для выяснения этой связи сопоставим основное уравнение молекулярно-кинетической теории газов и уравнение Клапейрона—Менделеева. Приравняем правые части уравнений (3.9) и (3.4):  $\frac{2}{3} N \bar{\epsilon} = \frac{m}{\mu} RT$ . В одном моле газа ( $m = \mu$ ) всегда содержится одно и то же число молекул  $N_A =$

$= 6,023 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup>, называемое *числом Авогадро*, поэтому для одного моля последнее уравнение принимает вид  $\frac{2}{3} N_A \bar{\epsilon} = RT$  или

$$\bar{\epsilon} = \frac{3}{2} \frac{R}{N_A} T. \quad (3.10)$$

Подставим это значение  $\bar{\epsilon}$  в уравнение (3.8):

$$p = n \frac{R}{N_A} T. \quad (3.11)$$

Отношение универсальной газовой постоянной к числу Авогадро

$$k = \frac{R}{N_A}$$

является фундаментальной константой. Эта константа называется *постоянной Больцмана*. В системе СИ  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К. Воспользуемся постоянной Больцмана и запишем (3.11) в окончательном виде

$$P = nkT.$$

Это выражение по сути дела соответствует эмпирическому закону Шарля.

При выводе основного уравнения молекулярно-кинетической теории использовалась модель идеального газа. Реальные же молекулы имеют конечные размеры и характеризуются некоторым собственным объемом. На рис. 3.4 показано, что центры молекул радиусом  $r$  не могут сблизиться на расстояние, меньшее, чем  $2r$ . Разреженный газ занимает большой объем, по сравнению с которым собственный объем молекул пренебрежимо мал. При сильном сжатии пренебрегать собственным объемом уже нельзя. Например, при давлении 5000 атмосфер собственный

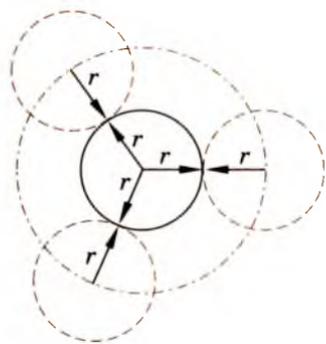


Рис. 3.4

объем молекул составляет уже половину всего занимаемого газом объема, т. е. свободный объем уменьшается в 2 раза. Уменьшение свободного объема можно учесть, если в уравнение Клапейрона—Менделеева ввести соответствующую поправку:  $p(V - b) = RT$ . Далее следует учесть, что между молекулами реального газа действуют силы притяжения, благодаря которым молекулы, находящиеся у стенок, будут втягиваться в объем. Это равносильно действию добавочного давления. Добавочное давление про-

порционально квадрату концентрации молекул или обратно пропорционально квадрату объема.

Следовательно, для более точного отражения свойств реального газа нужно в уравнение Клапейрона—Менделеева ввести поправку на добавочное («внутреннее») давление, равную  $\frac{a}{V^2}$ .

Введение вышеназванных поправок приводит к уравнению Ван-дер-Ваальса (3.5):

$$\left(p + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = RT.$$

Численные значения поправок  $a$  и  $b$  определяются свойствами конкретных газов.

### 3.3.3. Физический смысл температуры

Температура, как один из макропараметров, есть понятие эмпирическое. О ней судят, например, по физиологическому ощущению (тепло, холодно, жарко), по изменению каких-либо физических характеристик материальных тел (объем газов и жидкостей, цвета раскаленных предметов) и т. п. Физический же смысл температуры при этом остается неясным.

Вернемся к соотношению (3.10), в котором заменим  $\frac{R}{N_A}$  постоянной Больцмана  $k$ :

$$\bar{\epsilon}_k = \frac{3}{2} kT. \quad (3.12)$$

Отсюда ясно, что *температура определяется средней кинетической энергией хаотического движения молекул*, т. е., как и давление, это понятие присуще лишь статистической системе и не существует у отдельной молекулы или атома.

Из соотношения (3.12)  $\bar{\epsilon} = \frac{m\bar{v}^2}{2} = \frac{3}{2} kT$  следует, что температура идеального газа не зависит от концентрации молекул, от их массы и других микропараметров, кроме средней кинетической энергии. Если газ состоит из смеси разнородных молекул и находится при постоянной температуре, то средняя кинетическая энергия всех сортов молекул одинакова:  $\frac{m_1\bar{v}_1^2}{2} = \frac{m_2\bar{v}_2^2}{2} = \frac{m_3\bar{v}_3^2}{2} = \dots$   
 $\dots = \frac{3}{2} kT.$

Опыт показывает, что при соприкосновении двух тел, имеющих первоначально различную температуру, начинается ее по-

степенное выравнивание за счет перехода тепла от более нагретого к менее нагретому телу. С точки зрения молекулярно-кинетической теории этот процесс можно представить так. Первоначально молекулы одного и другого тела имеют различные средние кинетические энергии — соответственно  $\frac{3}{2}kT_1$  и  $\frac{3}{2}kT_2$ . В результате хаотического столкновения молекул в области соприкосновения тел будет происходить постепенный обмен энергией с ее усреднением, и со временем все молекулы станут характеризоваться средней кинетической энергией  $\frac{3}{2}kT_3$ , т. е. оба тела примут температуру  $T_3$ .

Взаимосвязь температуры со средней кинетической энергией молекул имеет место не только для газа, но и для любых макроскопических тел. В частности, повышение температуры при заболевании связано с усиленным выделением энергии в организме, которая идет на борьбу эритроцитов с болезнетворными микробами. Если очаг инфекции локализован, например, ранка на пальце, то повышается температура только этого участка тела. В ослабленном организме выделение энергии уменьшается и температура может стать ниже нормальной.

После более детального знакомства со статистикой газа мы еще раз вернемся к уточнению физического смысла температуры.

### 3.3.4. Распределение Максвелла—Больцмана

В жизни очень многие события и величины являются случайными. Например, нельзя заранее точно сказать, сколько человек в течение месяца заболеют гриппом, с какой скоростью пройдет по улице автомобиль, сколько зерен будет содержать сорванный колос пшеницы, и т. п. Случайными являются и микропараметры, которыми обладает в данный момент какая-либо молекула газа.

Но хотя случайные величины не могут быть точно предсказаны заранее, они подчиняются определенным законам — законам статистики. Последние отчетливо проявляются, например, в распределении учеников класса по росту (рис. 3.5), в распределении волокон хлопка по длине (рис. 3.6) и т. д. Подобным же образом можно рассмотреть и распределение молекул по скоростям. Поскольку газ представляет собой статистическую систему, а скорости молекул есть величины случайные, то нет смысла предсказывать скорость отдельной молекулы или число моле-

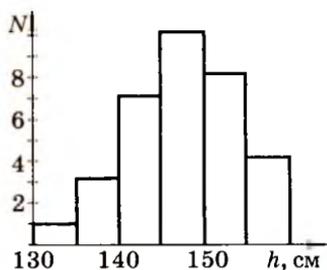


Рис. 3.5

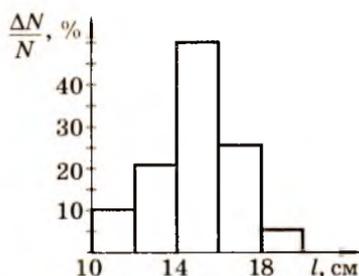


Рис. 3.6

кул, обладающих, например, скоростью, точно равной 340 м/с. Распределение молекул по скоростям можно охарактеризовать отношением  $\frac{\Delta N}{\Delta v}$ , где  $\Delta v$  — интервал скоростей от  $v$  до  $v + \Delta v$ , а  $\Delta N$  — число молекул, скорости которых лежат в этом интервале. Иногда при этом используют относительное число молекул  $\frac{\Delta N}{\Delta v N}$  ( $N$  — полное число молекул в рассматриваемом объеме газа). Для примера на рис. 3.7 и в таблице приведено распределение молекул кислорода по скоростям при температуре 273 К. При бесконечном уменьшении интервала скоростей ( $\Delta v \rightarrow 0$ ) ступенчатая кривая перейдет в плавную, которая на рис. 3.7 изображена пунктиром. В этом случае вместо величины  $\frac{\Delta N}{\Delta v}$  следует рассматривать отношение бесконечно малых величин  $\frac{dN}{dv}$ . Данное отношение, зависящее от скорости, называется *функцией распределения молекул* газа по скоростям:  $\frac{dN}{dv} = f(v)$ .

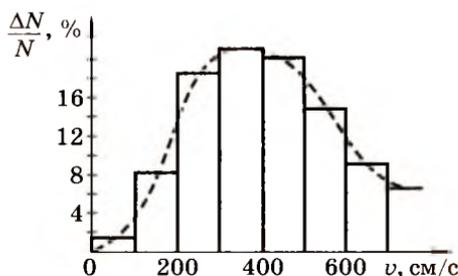


Рис. 3.7

$\Delta v$ , м/с	$\frac{\Delta N}{\Delta v N} \cdot 100\%$
0—100	1,4
101—200	8,1
201—300	16,7
301—400	21,5
401—500	20,3
501—600	15,1
601—700	9,2

Функция распределения показывает число молекул, скорости которых лежат в единичном интервале. Аналитически эту функцию определил Максвелл (1851—1879):

$$\frac{dN}{dv} = N4\pi \left( \frac{m}{2\pi kT} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{mv^2}{2kT}} v^2. \quad (3.13)$$

Вид функции распределения Максвелла экспериментально был впервые проверен Штерном в 1932 г. Прибор для проведения опыта Штерна состоит из двух жестко скрепленных коаксиальных цилиндров, по оси которых натянута серебряная проволочка (рис. 3.8, а). Внутренний цилиндр имеет узкую прорезь. В пространстве между цилиндрами создан вакуум. Проволочка раскаляется так, что молекулы серебра начинают испаряться и радиально разлетаться. На рис. 3.8, б их траектория изображена пунктиром. Некоторая часть этих молекул через щель в малом цилиндре будет достигать стенки наружного цилиндра и осадаться на ней в некоторой точке А. Заметим, что в эту точку будут прилетать все молекулы, прошедшие через прорезь, независимо от величины их скорости. Пусть скорость молекул равна  $v$ , тогда расстояние между цилиндрами они пролетят за время

$$\Delta t \approx \frac{R}{v}. \quad (3.14)$$

Если привести цилиндры во вращательное движение с угловой скоростью  $\omega$ , то за время  $\Delta t$  система повернется на угол  $\Delta\varphi = \omega\Delta t$ . Молекулы, прошедшие через щель, будут по-прежнему сдвигаться относительно неподвижной системы отсчета относительно, но относительно вращающихся цилиндров их траектория будет криволинейной (на рис. 3.8, б она изображена сплошной линией). С учетом (3.14) угол отклонения молекулы от первоначального положения можно представить в виде

$$\Delta\varphi \approx \omega \frac{R}{v}.$$

Из этого соотношения следует, что молекулы, обладающие разными скоростями, отклонятся на разные углы. Количество серебра, осадившееся в некотором угловом интервале  $d(\Delta\varphi)$ , пропорционально числу молекул, скорости которых находятся в интервале  $dv$ . Таким образом, профиль осевшего на

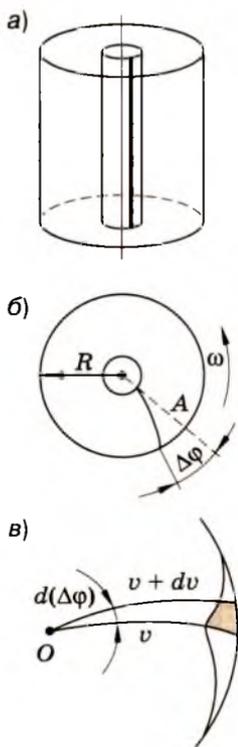


Рис. 3.8

стенку вещества будет экспериментальной кривой распределения молекул по скоростям. Графически такая кривая представлена на рис. 3.9, из которого видно, что функция распределения Максвелла имеет максимум. Скорость, соответствующая этому максимуму, называется *наиболее вероятной скоростью* ( $v_{\text{в}}$ ). Это означает, что наибольшее число молекул обладает скоростями, близкими к данной. Аналитически наиболее вероятная скорость определяется выражением

$$v_{\text{в}} = \sqrt{\frac{2kT}{m}}.$$

Численно  $v_{\text{в}}$  оказывается меньше и средней арифметической  $\bar{v}$  и средней квадратичной скорости, которые могут быть выражены соответственно как  $\bar{v} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}$  и  $v' = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$ .

Из функции распределения Максвелла можно извлечь большую информацию о газе. Так, например:

1. Из выражения для наиболее вероятной скорости следует, что положение максимума кривой распределения зависит от температуры. С ростом температуры он сдвигается в сторону бóльших скоростей (рис. 3.10). Легко убедиться, что площадь, ограниченная кривой распределения и некоторым интервалом скоростей (на рис. 3.9 такая площадка заштрихована), численно равна числу молекул, скорости которых лежат в этом интервале ( $\frac{dN}{dv} \cdot dv = dN$ ). Вся площадь, ограниченная кривой распре-

деления Максвелла, определяется интегралом  $\int_0^{\infty} \frac{dN}{dv} dv = \int_0^N dN = N$ ,

т. е. равна полному числу молекул, содержащихся в рассматриваемом объеме газа. Из этого следует, что при неизменном числе молекул площади под кривыми распределения для любых температур будут одинаковыми (см. рис. 3.10).

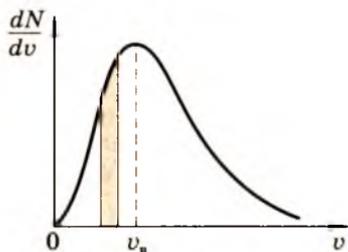


Рис. 3.9

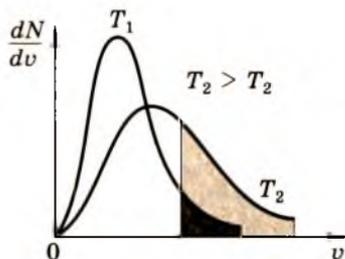


Рис. 3.10

Еще раз отметим, что законы статистики не позволяют получить ответ на вопрос о числе молекул, обладающих конкретной скоростью, например 301 м/с. В силу случайного характера микропараметров газа может оказаться, что такой скоростью не будет обладать вообще ни одна молекула. Из распределения Максвелла можно определить лишь вероятное число молекул, скорости которых лежат в некотором интервале.

2. Из опыта известно, что с повышением температуры скорости химических реакций возрастают. Этот факт объясняется тем, что с ростом температуры значительно увеличивается число молекул, обладающих большими скоростями, которые легче всего вступают в реакции. На рис. 3.10 площади, соответствующие таким молекулам, заштрихованы.

3. Распределение Максвелла является равновесным. Это означает, что в естественных условиях оно будет сохраняться сколь угодно долго. Более того, любая неравновесная система молекул в отсутствие внешнего воздействия придет в состояние равновесия, и в ней обязательной установится распределение Максвелла. Например, если в пустой сосуд впустить молекулы газа, обладающие одинаковыми скоростями, то через некоторое время в результате хаотических столкновений и обмена энергией все молекулы распределятся по скоростям в соответствии с функцией Максвелла.

4. Из сказанного выше следует такой вывод. В равновесном состоянии каждой температуре газа соответствует своя функция распределения Максвелла и, наоборот, каждому распределению Максвелла соответствует своя температура газа. Это обстоятельство позволяет еще более уточнить физический смысл температуры. Температура — это не просто характеристика средней кинетической энергии молекул. Она имеет физический смысл лишь в том случае, когда в статистической системе установилось распределение Максвелла. Например, если в пустой сосуд впущены молекулы, обладающие одинаковой скоростью, то такой газ нельзя характеризовать определенной температурой. Иногда имеет место очень специфическое состояние, при котором в одном и том же объеме содержатся частицы разного типа, причем в равновесии друг с другом находятся лишь однотипные частицы. Примером может служить низкотемпературная плазма — разреженный газ, состоящий из ионов и электронов. В такой плазме функция распределения электронов по скоростям отличается от функции распределения ионов, поэтому в данной системе можно говорить лишь отдельно о температурах ионного и электронного газа и не имеет смысла температура плазмы как целого. Характерно, что при этом электронная температура в сотни раз выше ионной.

Работы Максвелла были развиты Больцманом (1844—1906), который показал, что более общим является распределение не по скоростям, а по энергиям. Заменяя в уравнении (3.13)  $\frac{mv^2}{2}$  на  $\epsilon$ , можно записать функцию распределения в виде

$$\frac{dN}{d\epsilon} = N \frac{2}{\sqrt{\pi kT}} e^{\frac{\epsilon}{kT}} \sqrt{\epsilon}.$$

Это выражение называется *функцией распределения Больцмана*.

Статистика, которой подчиняется газ, часто называется статистикой Максвелла—Больцмана.

### 3.3.5. Статистические методы в биологии

Статистические методы широко применяются не только в физике, но и в других областях науки. Большое место они занимают в биологии и медицине. Биологические и медицинские исследования очень часто связаны с накоплением и анализом огромного числа экспериментальных фактов. В первую очередь это относится к теории медицинского анализа, биометрии, изучению мутаций, популяций и т. п. Для примера на рис. 3.11 приведены результаты статистической обработки вирусной биометрии. Распределение по размерам показывает, что среди вирусов преобладают частицы двух видов, т. е. инфекция смешанная и при лечении это следует учитывать. На рис. 3.12 представлено изменение площади листьев растений в период вегетации. Эти данные также являются статистическими. Очевидно, что одиночные измерения размеров вируса или площади листа не могут отражать свойств огромной совокупности объектов, которая является уже статистической системой.

Необходимость использования статистики связана не только со спецификой изучаемых явлений. При любых многократных

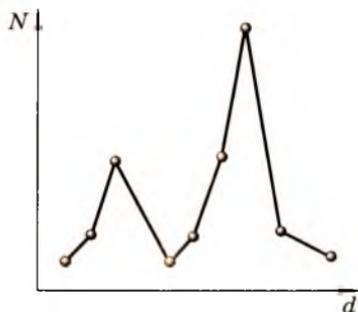


Рис. 3.11

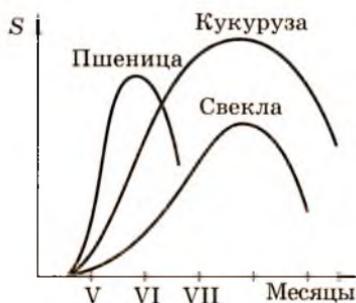


Рис. 3.12

изменениях одной и той же величины наблюдается разброс экспериментальных значений, которые группируются вокруг некоторого центрального значения. В таких случаях относительная частота появления результата  $x$ , отклоняющегося от центрального на величину  $\Delta x$  в пределах от  $\Delta x$  до  $\Delta x + dx$ , определяется выражением

$$P = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\Delta x)^2}{2\sigma^2}} dx, \quad (3.15)$$

где  $\sigma$  — среднее квадратичное отклонение. Распределение, подчиняющееся выражению (3.15), называется нормальным (рис. 3.13).

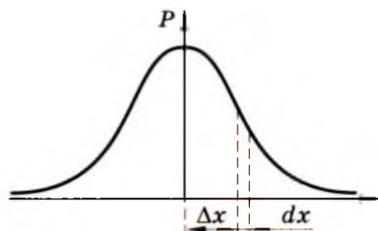


Рис. 3.13

При статистической обработке экспериментальных результатов особое значение имеют следующие параметры нормального распределения.

1. Среднее арифметическое значение измеряемой величины

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}$$

точнее всего соответствует ее истинному значению.

2. Ошибку измерения принято характеризовать либо средним квадратичным отклонением

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N |\Delta x_i|^2}{N}},$$

либо средним отклонением

$$\overline{\Delta x} = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta x_i}{N},$$

где  $\Delta x_i$  — отклонение результатов отдельных измерений от среднего арифметического, а  $N$  — число произведенных измерений. При нормальном распределении 69% результатов измерений лежат в интервале от  $-\sigma$  до  $+\sigma$ , или 55% — в интервале от  $-\Delta x$  до  $+\Delta x$ .

Во всех экспериментальных исследованиях необходимо определять среднее арифметическое значение измеряемой величины, а также  $\sigma$  или  $\overline{\Delta x}$ .

Окончательный результат может быть представлен в виде  $(\bar{x} \pm \sigma)$  или  $(\bar{x} \pm \overline{\Delta x})$ .

### 3.4. ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА В ГАЗАХ

В природе имеет место ряд явлений, которые обусловлены перемешиванием газа при хаотическом движении молекул. Например:

1. Если молекулы газа первоначально распределяются по объему неравномерно (рис. 3.14, а), то со временем в отсутствии внешних сил поток молекул из более плотной части газа в менее плотную будет больше, чем обратный, т. е. плотность в объеме будет постепенно выравниваться. Этот процесс называется **диффузией**.

2. Если разные части некоторого объема газа первоначально имеют различную температуру (рис. 3.14, б), то молекулы, которые попадают из более нагретой части в менее нагретую, обладают большей энергией, чем молекулы, попадающие из менее

нагретой части в более нагретую. В результате средняя энергия молекул газа (а значит, и температура) также постепенно выравнивается. Процесс переноса молекулами внутренней энергии называется **теплопроводностью**.

3. Если привести в движение какой-либо слой газа (на рис. 3.14, в его скорость обозначена  $v_0$ ), то между ним и соседними неподвижными слоями возникают силы **внутреннего трения**, под действием которых соседние слои тоже придут в движение. Внутреннее трение обусловлено переходом молекул из одного слоя в другой и переносом определенного количества движения. Внутреннее трение иначе называется **вязкостью**.

Диффузия, теплопроводность и вязкость называются **явлениями переноса**. Перенос какой-либо физической величины  $y$  вдоль направления  $x$  через единичную площадку в единицу времени определяется **уравнением переноса**:

$$y = -A \frac{dy}{dx},$$

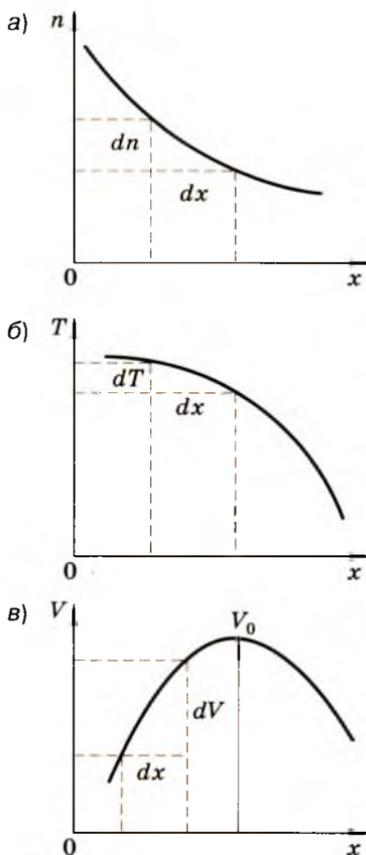


Рис. 3.14

где  $A$  — постоянная величина. Знак «минус» означает, что перенос физической величины осуществляется в том направлении, в котором она уменьшается. Например, тепло переходит от более нагретой части газа к менее нагретой и т. п.

Величина  $\frac{dy}{dx}$  называется градиентом переносимой величины. Градиент показывает на сколько изменяется величина при перемещении вдоль оси  $x$  на единицу длины. Градиент можно определить, например, графически (см. рис. 3.14).

Применительно к диффузии, теплопроводности и вязкости уравнения переноса можно записать соответственно следующие выражения:

$$j = -D \frac{dn}{dx},$$

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx},$$

$$f_{\text{тр}} = -\eta \frac{dv}{dx},$$

где  $j$  — поток молекул, диффундирующих через единицу площади в единицу времени,  $q$  — поток тепла, проходящий через единицу площади за единицу времени,  $f_{\text{тр}}$  — сила внутреннего трения, действующая на единицу площади,  $D$ ,  $\lambda$ ,  $\eta$  — соответственно коэффициенты диффузии, теплопроводности и вязкости,  $n$  — концентрация молекул,  $T$  — температура,  $v$  — скорость направленного движения молекул газа.

Явления переноса играют очень важную роль в природе. Например, дыхание осуществляется путем диффузии кислорода в ткани организма через те или иные его внешние или внутренние покровы. Количество перенесенного вещества про-

порционально потоку молекул  $j = -D \frac{dn}{dx}$  и площади, через которую осуществляется перенос, поэтому органы дыхания (легкие у животных, листья у растений) имеют большую площадь соприкосновения с атмосферой. Диффузия является также главным механизмом газообмена между почвенным и атмосферным воздухом.

Явления переноса имеют место в жидкостях и твердых телах, причем по форме уравнения переноса остаются теми же, но численные значения коэффициентов  $D$ ,  $\lambda$  и  $\eta$  в твердых телах, жидкостях и газах значительно различаются. Кроме того, коэффициенты переноса по-разному зависят от различных физических параметров. Например, с увеличением температуры вязкость газа растет, а жидкости падает и т. п.

## 3.5. ТЕРМОДИНАМИКА

Исторически термодинамика возникла как наука о теплоте, но в настоящее время под термодинамикой, как уже было сказано выше, понимают и метод изучения очень широкого круга вопросов, связанных с передачей различных видов энергии от одного тела к другому. Этот метод применим к газам и жидкостям, к твердым телам и плазме, к химическим реакциям и световым явлениям.

Термодинамика основана на трех эмпирических законах, которые называются *началами*.

### 3.5.1. Первое начало термодинамики. Теплоемкость

Если наблюдать за свободными колебаниями маятника или движением автомобиля по горизонтальному пути с выключенным двигателем, то может создаться впечатление, что закон сохранения энергии не выполняется, поскольку и маятник и автомобиль через некоторое время теряют свой запас энергии и останавливаются. Однако опыт показывает, что изменение энергии сопровождается не только совершением работы, но и выделением определенного количества тепла. В опыте с маятником за счет трения будут нагреваться нить и кронштейн в месте подвеса нити, грузик и воздух и т. д. Количественные измерения подтверждают, что закон сохранения энергии справедлив и при тепловых процессах, применительно к которым он носит название *первого начала термодинамики*:

$$dU = dQ - dA \quad (3.16)$$

— изменение внутренней энергии\*  $dU$  равно разности полученной телом теплоты  $dQ$  и произведенной им работы  $dA$ \*\*.

Первое начало термодинамики часто записывают в таком виде:

$$dQ = dU + dA, \quad (3.17)$$

т. е. *количество теплоты, полученное телом, идет на увеличение его внутренней энергии и совершение им работы.*

Из уравнения (3.16) следует, что *теплота и работа есть две различные формы передачи энергии*. Других форм передачи энергии не существует. Работа определяется изменением ме-

---

\* Внутренняя энергия тела состоит из кинетической энергии хаотического движения молекул и потенциальной энергии их взаимодействия.

\*\* Принято считать, что работа, совершенная телом, как и полученная им теплота, имеют знак «плюс».

ханической энергии тела, а теплота — изменением его внутренней энергии, поэтому теплота и работа измеряются в одних и тех же единицах.

Рассмотрим, опираясь на первое начало термодинамики, вопрос о теплоемкости газообразных и твердых тел. **Теплоемкостью называется количество теплоты, необходимое для нагревания тела на один градус:**

$$C = \frac{dQ}{dT}. \quad (3.18)$$

В физике чаще всего используется **молярная теплоемкость**, т. е. теплоемкость одного моля вещества. В технике пользуются **удельной теплоемкостью**, которой называется теплоемкость единицы массы вещества.

В соответствии с (3.17) и (3.18) можно записать:

$$C = \frac{dQ}{dT} = \frac{dU}{dT} + \frac{dA}{dT}.$$

Видно, что теплоемкость зависит от того, при каких условиях сообщается телу тепло. Если при нагревании объем тела, например, газ в герметичном сосуде, остается неизменным (рис. 3.15, а), то механическая работа равна нулю ( $dA = 0$ ) и теплоемкость в этом случае определяется выражением

$$C_V = \frac{dU}{dT}.$$

Эта величина называется **теплоемкостью при постоянном объеме**. Если в процессе нагревания поддерживать постоянным давление, то газ в сосуде будет расширяться (рис. 3.15, б), производя работу  $dA = Fdl = pSdl = pdV$ .

Поскольку  $dA = pdV$ , то **теплоемкость при постоянном давлении** может быть записана следующим образом:

$$C_p = C_V + p \frac{dV}{dT}.$$

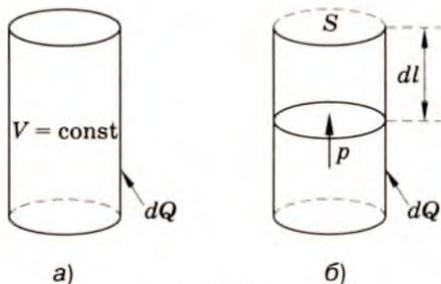


Рис. 3.15

Допустим, что газ в сосуде — идеальный. Внутренняя энергия 1 моля идеального газа определяется только кинетической энергией хаотического движения молекул и равна  $U = N_A 3/2 kT = 3/2 RT$ , следовательно, молярная теплоемкость при постоянном объеме может быть записана так:

$$C_V = \frac{dU}{dT} = \frac{3}{2} R.$$

Из уравнения Клапейрона—Менделеева для одного моля газа ( $pV = RT$ ) следует, что  $pdV = RdT$  и  $\frac{dV}{dT} = \frac{R}{p}$ . Подставим это значение  $\frac{dV}{dT}$  в выражение теплоемкости  $C_p$  и получим

$$C_p = C_V + R.$$

Видно, что молярная теплоемкость идеального газа при постоянном давлении  $C_p$  превышает  $C_V$  на величину  $R$ , следовательно, *универсальная газовая постоянная ( $R$ ) численно равна работе по расширению 1 моля газа при нагревании его при постоянном давлении на 1 К.*

Теплоемкость реальных одноатомных газов (He, Ne, Ar и др.) при достаточно высокой температуре хорошо согласуется с выражением (3.19), однако для двухатомных газов ( $H_2$ ,  $O_2$ ) при  $T \sim 100\text{—}400$  К  $C_V = 5/2 R$ , а для трехатомных ( $CO_2$ ,  $H_2O$ )  $C_V = 6/2 R$ . Эти различия обусловлены следующими причинами. Для определения положения в пространстве молекулы идеального газа (как материальной точки) нужно задать три координаты ( $xyz$ ). Число независимых координат, однозначно определяющих положение материального тела в пространстве, называется *числом степеней свободы*. Так как средняя кинетическая энергия молекул идеального газа, имеющих три степени свободы, равна  $3/2 kT$ , то, учитывая, что все степени свободы равноправны, полагают, что на каждую из них приходится энергия  $\bar{\epsilon} = 1/2 kT$ . Молекулы двухатомного газа помимо поступательного движения могут вращаться в двух взаимно перпендикулярных направлениях (рис. 3.16), т. е. имеют пять степеней свободы, поэтому у них  $\bar{\epsilon} = 5/2 kT$ , а  $C_V = 5/2 R$ . Трех- и более атомные молекулы имеют шесть степеней свободы:  $\bar{\epsilon} = 6/2 kT$ , а  $C_V = 6/2 R$ .

В твердых телах атомы могут совершать только колебательные движения в трех взаимно перпендику-

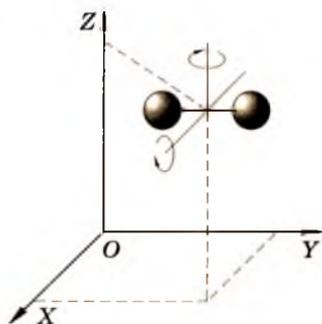


Рис. 3.16

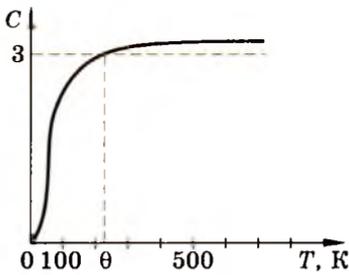


Рис. 3.17

лярных направлениях, т. е. характеризуются тремя степенями свободы. Колеблющийся атом обладает потенциальной и кинетической энергией, причем средняя кинетическая энергия равна средней потенциальной энергии. В связи с этим на одну колебательную степень свободы приходится энергия, равная  $5/2kT = kT$  и молярная теплоемкость твердых тел\* должна быть равна

$$C = 3R.$$

Эта формула выражает *закон Дюлонга и Пти*. На рис. 3.17 представлена экспериментальная зависимость теплоемкости кристалла химически простого вещества от температуры. Видно, что закон Дюлонга и Пти при низких температурах не выполняется\*\*. Отклонение экспериментальной теплоемкости от теоретической при низких и очень высоких температурах наблюдается и у газов. Эти расхождения обусловлены тем, что классическая теория не учитывает особенности строения и взаимодействия молекул. Более точная теория теплоемкости создана в рамках квантовой механики. В настоящем пособии она не рассматривается.

### 3.5.2. Обратимые и необратимые процессы

Любое изменение макросостояния тела или системы тел называется *процессом*. Процесс, который протекает при постоянной температуре, называется *изотермическим*. Аналитическое выражение изотермы идеального газа легко получить из уравнения Клапейрона—Менделеева:

$$pV = \text{const.}$$

Если процесс протекает без теплообмена с окружающей средой, то он называется *адиабатическим*. Уравнение адиабаты можно записать в виде

$$pV^\gamma = \text{const}$$

или, с учетом уравнения Клапейрона—Менделеева, в виде

$$TV^{\gamma-1} = \text{const.}$$

\* Расширение твердого тела при нагревании невелико, поэтому вместо  $C_V$  и  $C_p$  можно говорить просто о теплоемкости твердого тела.

\*\*Температура, при которой начинается отклонение от закона Дюлонга и Пти называется характеристической температурой Дебая  $\theta$ .

Величина  $\gamma = C_p/C_v$ , т. е. всегда больше единицы, поэтому адиабата в координатах  $(p, V)$  спадает круче, чем изотерма (рис. 3.18).

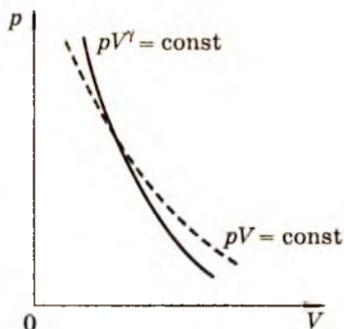


Рис. 3.18

Многие реальные процессы близки к изотермическим или адиабатическим. Например, все млекопитающие представляют собой изотермические системы. Сжатие воздуха при взрыве — адиабатический процесс, поскольку из-за плохой теплопроводности воздуха за малый промежуток времени обмена теплотой

между областями сжатого и разряженного воздуха не происходит.

Помимо двух названных выше процессов могут быть и другие процессы: изохорический (протекающий при постоянном объеме), изобарический (протекающий при постоянном давлении) и др.

Все термодинамические процессы разделяются на **обратимые** и **необратимые**.

Обратимым называется такой процесс, который, будучи проведенным в противоположном направлении, возвращает систему в первоначальное состояние и не вызывает при этом никаких изменений в окружающей среде. Если же при возвращении системы в первоначальное состояние в окружающей среде произошли какие-либо изменения, то процесс будет необратимым.

Любой идеальный механический процесс, например, колебания маятника без трения, может служить примером обратимого процесса. Однако для поддержания постоянной амплитуды реальных колебаний необходимо все время сообщать колеблющейся системе некоторую энергию извне, т. е. реальный процесс будет необратимым.

Другой пример необратимого процесса — расширение газа в пустоту. Если убрать перегородку, разделяющую занятую газом и свободную части сосуда (рис. 3.19), то газ самопроизвольно заполнит весь сосуд, но чтобы вернуть систему в исходное состояние (собрать газ в одной части сосуда), потребуется совершить внешнюю работу. Практика показала, что **любые естественные процессы, протекающие в природе, необратимы**. Легко убедиться, что процессы, протекающие бесконечно медленно (квазистатически), так что равновесие в системе не нарушается, будут обратимыми. Но ясно и то, что бесконечно медленные процессы на практике реализоваться не могут.

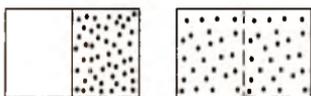


Рис. 3.19

### 3.5.3. Второе начало термодинамики

Из первого начала термодинамики вытекает вывод о невозможности создания вечного двигателя первого рода — машины, которая позволяла бы получать работу без затраты эквивалентного количества энергии. В то же время первое начало термодинамики не отрицает возможности существования *вечного двигателя второго рода* — машины, которая позволяла бы за счет полученного тепла производить эквивалентную работу\*, т. е. имеющей коэффициент полезного действия, равный 100%. Однако термодинамика утверждает, что *не существует процесса, единственным результатом которого было бы отнятие тепла у менее нагретого тела и передача его более нагретому телу*. Иными словами, в природе невозможен самопроизвольный переход тепла от менее нагретого тела к более нагретому. В этом заключается *второе начало термодинамики*\*\* . В такой формулировке оно кажется очевидным и не вызывает сомнения — еще никому не удавалось погреться у холодной печки. Менее очевидна другая формулировка: *вечный двигатель второго рода невозможен*, т. е. невозможен такой процесс, единственным результатом которого является охлаждение некоторого тела и производство эквивалентной работы. Убедимся в равнозначности этих формулировок, доказав ее методом от противного. Пусть вечный двигатель второго рода существует. Он забирает тепло от тела 1 (рис. 3.20), температура которого  $T_1$ , и производит

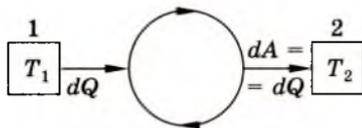


Рис. 3.20

эквивалентную работу  $dA = dQ$ . Затем посредством трения эта работа полностью переводится в тепло, которое сообщается телу 2 с температурой  $T_2$ . Заметим, что механическая работа всегда может быть полностью переведена в теплоту, в том числе и при  $T_2 > T_1$ . В результате такого процесса произойдет переход тепла от менее нагретого тела (1) к более нагретому телу (2) без каких-либо изменений в окружающей среде, т. е. фактически самопроизвольно. Итак, нарушение одной

\* Вечный двигатель второго рода мог бы работать, например, за счет тепла, отбираемого у земного шара, т. е. практически бесконечно долго.

\*\* Работа холодильных машин, например, бытовых холодильников не противоречит второму началу термодинамики. В холодильных установках тепло переходит от менее нагретых тел к более нагретым не самопроизвольно. Этот процесс осуществляется за счет работы, совершаемой внешними силами.

формулировки повлекло за собой нарушение другой, следовательно, эти формулировки эквивалентны.

Невозможность создания вечно-го двигателя второго рода означает, что коэффициент полезного действия (КПД) тепловых машин не может достигать 100%. Рассмотрим вопрос о КПД подробнее. Любая постоянно действующая машина должна работать по замкнутому циклу, т. е. через некоторое время система должна возвращаться в исходное состояние. В теоретической термодинамике важное место занимает идеальный цикл Карно (1796—1832) (рис. 3.21), рабочим веществом в котором служит идеальный газ, а изотермические и адиабатические процессы протекают бесконечно медленно, не нарушая равновесия внутри газа, так что цикл является обратимым.

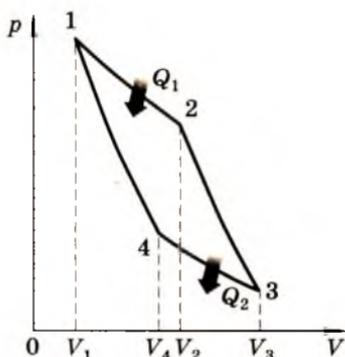


Рис. 3.21

Участки 1—2 и 3—4 являются изотермами. На участке 1—2 газ расширяется при постоянной температуре, получая теплоту  $Q_1$  от нагревателя с температурой  $T_1$ . На участке 3—4 газ изотермически сжимается, отдавая некоторое количество теплоты  $Q_2$  холодильнику с температурой  $T_2$ . Участки 2—3 и 4—1 соответствуют адиабатическому расширению и сжатию, протекающим без обмена энергией с окружающей средой.

Изменение внутренней энергии газа за полный цикл равно нулю, поэтому произведенная газом работа  $A = Q_1 - Q_2$  и коэффициент полезного действия можно выразить так:

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}.$$

Поскольку изотермические процессы 1—2 и 3—4 протекают при постоянных температурах, то из первого начала термодинамики следует, что работа, совершенная на участке 1—2  $A_1 = Q_1$ , а на участке 3—4  $A_2 = Q_2$ . Ранее было показано (см. 3.5.1), что работа по расширению или сжатию газа  $dA = pdV$ . Подсчитаем

работу на участке 1—2, равную  $A_1 = \int_{V_2}^{V_1} pdV$ . На основании урав-

нения Клапейрона—Менделеева можно записать  $p = \frac{m}{\mu} RT \cdot \frac{1}{V}$ .

Подставим это значение  $p$  в предыдущую формулу и вычис-

лим работу на участке 1—2:  $A_1 = \frac{m}{\mu} RT_1 \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V}$  и в результате получим

$$A_1 = \frac{m}{\mu} RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1}. \quad (3.19)$$

По аналогии с этим  $A_2 = \frac{m}{\mu} RT_2 \ln \frac{V_3}{V_4}$ .

В итоге выражение для коэффициента полезного действия запишется в виде

$$\eta = \frac{T_1 \ln \frac{V_2}{V_1} - T_2 \ln \frac{V_3}{V_4}}{T_1 \ln \frac{V_2}{V_1}}.$$

Теперь убедимся, что для цикла Карно выполняется соотношение  $\frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4}$ . Из уравнения адиабаты  $TV^{\gamma-1} = \text{const}$  следует, что процессы 2—3 и 4—1 можно записать соответственно как  $T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_4^{\gamma-1}$  и  $T_1 V_2^{\gamma-1} = T_2 V_3^{\gamma-1}$ . Поделим почленно второе равенство на первое и получим  $\frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4}$ . Следовательно,  $\ln \frac{V_2}{V_1} = \ln \frac{V_3}{V_4}$ , и выражение для КПД можно записать в виде

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (3.20)$$

*— коэффициент полезного действия тепловой машины, работающей по циклу Карно, равен разности температур нагревателя и холодильника, деленной на температуру нагревателя.*

Поскольку конечная формула (3.20) не содержит параметров рабочего вещества, можно полагать, что она справедлива для обратимого цикла Карно, в котором рабочим телом является не только идеальный газ, но и произвольное тело. Коэффициент полезного действия машин, работающих по необратимому циклу, будет ниже, чем это вытекает из формулы (3.19).

Сделанный вывод о коэффициенте полезного действия теплосиловых машин имеет большое практическое значение. В качестве холодильника обычно используется окружающая среда, например, атмосферный воздух. Использовать холодильники с более низкой температурой (сухой лед, жидкие газы и т. п.) чрезвычайно невыгодно, поскольку получение низких темпера-

тур связано с большими энергетическими затратами. Для повышения КПД существует только один реальный путь — повышение температуры нагревателя.

Поскольку коэффициент полезного действия обратимого теплового двигателя определяется только температурой нагревателя и холодильника, то по величине КПД можно в принципе судить об абсолютной температуре тел. Этот способ определения температуры называется *термодинамическим*.

### 3.5.4. Статистическое толкование второго начала термодинамики

Термодинамика лишь констатирует, что тепло самопроизвольно может переходить только от более нагретых тел к менее нагретым, что отняв от тела некоторое количество теплоты, нельзя произвести эквивалентную работу, что все естественные процессы необратимы и т. п. Она не в состоянии ответить на вопрос: «Почему так происходит?» Ответ на этот вопрос можно получить лишь при рассмотрении термодинамических явлений методами статистики.

Между механической энергией тела как целого, изменение которой соответствует произведенной телом работе, и внутренней энергией тела, изменение которой соответствует полученной телом теплоте, есть принципиальная разница. Механическая энергия распределена между одинаковыми частицами тела поровну, т. е. единственным способом. Внутренняя же энергия распределяется между молекулами тела, например, газа, огромным числом способов, поскольку при хаотическом движении молекул они могут приобретать самые различные по величине и направлению скорости.

Число возможных способов осуществления какого-либо состояния называется *статистическим весом*. Статистика показывает, что чем выше статистический вес данного состояния, тем оно более вероятно и тем ближе оно к равновесию. Убедиться в этом можно на примере, представленном на рис. 3.22. Здесь возможны два состояния шарика. Первое характеризуется энергией  $U_1 = mgh$ . В этом состоянии шарик может находиться только на острие карандаша. Во втором состоянии ( $U_2 = 0$ ) шарик располагается на плоскости. Первое состояние осуществимо лишь одним способом, тогда как число способов реализации второго состояния беско-

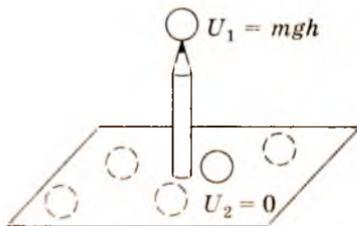


Рис. 3.22

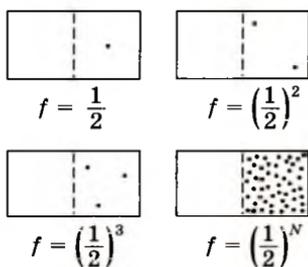


Рис. 3.23

нечно велико. Ясно, что во втором состоянии шарик будет находиться в равновесии и это состояние наиболее вероятно. Можно указать общее правило: **все равновесные состояния характеризуются максимальным статистическим весом.**

Естественные процессы протекают в сторону установления равновесия. Существование системы в равновесном состоянии наиболее вероятно и самопроизвольно она не может из него выйти, потому-то **все естественные процессы необратимы.** Проанализируем с точки зрения статистики процесс расширения газа в пустоту и подсчитаем вероятность обратного процесса — самопроизвольного сжатия газа. Допустим, что в сосуде находится всего одна молекула. Вероятность того, что она окажется в правой половине сосуда (рис. 3.23) равна  $f = 1/2$ . Если в сосуде имеются две молекулы, то вероятность их одновременного нахождения в правой части определяется произведением вероятностей нахождения там каждой молекулы, т. е.  $f = (1/2) \cdot (1/2) = (1/2)^2$ . Подобные рассуждения приводят к выводу, что вероятность самопроизвольного сосредоточения газа, содержащего  $N = 10^{20}$  молекул\* в одной половине сосуда определяется числом  $f = (1/2)^{10^{20}} \approx 1/100000000000000000000$ , т. е. практически равна нулю. Следовательно, такой процесс реализоваться не может. Подобным же образом можно проанализировать и другие естественные процессы.

Из сказанного вытекает, что **второе начало термодинамики имеет вероятностный характер.** В принципе можно допустить процесс самопроизвольного сжатия газа или самопроизвольного перехода теплоты от холодного тела к горячему, но вероятность реализации таких процессов бесконечно мала. Чем больше молекул содержит статистическая система, тем надежнее будет выполняться второе начало термодинамики. С другой стороны очевидно, что для одной, двух или трех молекул оно вообще не будет справедливо, поскольку для столь малого числа объектов законы статистики не применимы.

Количественной характеристикой равновесности состояния системы служит особая физическая величина, называемая **энтропией**. Больцман получил для энтропии следующее выражение

$$S = k \ln W,$$

\* Такое число молекул содержится при нормальных условиях в 4 кубических сантиметрах газа.

где  $k$  — постоянная Больцмана, а  $W$  — статистический вес состояния. Из статистики известно, что статистический вес состояния, в котором газ, содержащий  $N$  молекул, занимает объем  $V$ , пропорционален  $V^N$ , т. е.

$$W = \text{const } V^N.$$

Следовательно,

$$S = k \ln W = kN \ln V + \text{const.} \quad (3.21)$$

Если газ расширяется в пустоту, то его объем увеличивается, а энтропия, согласно (3.21), возрастает. Более того, из общих соображений можно заключить, что *энтропия возрастает\* во всех естественных процессах*, поскольку все они идут в сторону установления равновесия, т. е. в сторону возрастания статистического веса. Это утверждение также является одной из возможных формулировок второго начала термодинамики.

Подсчитаем изменение энтропии при расширении одного моля газа от объема  $V_1$  до объема  $V_2$ :

$$\Delta S = kN_A \ln \frac{V_2}{V_1} = R \ln \frac{V_2}{V_1}.$$

С другой стороны, работа, совершаемая при изотермическом квазистатическом (бесконечно медленном) расширении одного моля газа, равна полученному количеству теплоты и согласно (3.19)

$$\Delta Q = RT \ln \frac{V_2}{V_1}.$$

Из сравнения двух последних равенств получаем, что

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}$$

— *возрастание энтропии численно равно количеству теплоты, сообщенной телу при квазистатическом процессе, деленному на температуру по шкале Кельвина.*

Идеальный механический процесс (без трения) осуществляется без переноса тепла от одного тела к другому, поэтому  $\Delta S = 0$  и такой процесс будет обратим. Во всех необратимых процессах  $\Delta S > 0$ .

Замкнутая система стремится к равновесию, и ее энтропия возрастает. Это обстоятельство позволило Клаузиусу (1822—1888) выдвинуть тезис о «тепловой смерти» Вселенной. Действительно, если во Вселенной установится тепловое равновесие, то прекратятся всякие тепловые процессы, в том числе должна исчезнуть и жизнь. Теория «тепловой смерти» Вселенной ошибочна, во-первых, с философской точки зрения, так как

\* Речь идет о замкнутых системах.

она в конечном итоге предполагает существование сверхъестественной силы, которая первоначально вывела Вселенную из равновесия. Во-вторых, эта теория ошибочна и с физической точки зрения, поскольку Клаузиус неправомочно распространил второе начало термодинамики, справедливое для замкнутой системы, на всю бесконечную Вселенную.

### 3.5.5. Третье начало термодинамики

Третье начало термодинамики, иначе называемое теоремой Нернста, гласит, что *с приближением температуры к 0 К энтропия системы также стремится к нулю*. Это означает, что при 0 К исчезает хаотическое движение молекул и наступает их полное упорядочение. Статистический вес такого состояния равен единице, и следовательно

$$S = k \ln W = k \ln 1 = 0.$$

### 3.5.6. О термодинамике живых систем

Живые организмы представляют собой открытые термодинамические системы, поскольку они обмениваются с окружающей средой не только энергией, но и веществом. При этом они способны сохранять стационарное состояние, когда прирост энтропии в системе равен нулю:

$$\Delta S = 0,$$

т. е. живые организмы имеют тенденцию сопротивляться установлению термодинамического равновесия со средой. Например, температура человеческого тела остается постоянной в достаточно большом интервале температур, окружающей среды. Более того, жизнь создает и добавочную упорядоченность, проявляющуюся в определенном строении живых организмов. Следовательно, жизнь — это наименее вероятное состояние материи и сама по себе она не может существовать длительное время. Это состояние поддерживается за счет поступления энергии извне (главным образом, от Солнца). Поэтому изменения энтропии открытой системы складывается из изменения энтропии за счет процессов, протекающих внутри самой системы ( $\Delta S_c$ ) и за счет процессов обмена энергией и веществом с окружающей средой ( $\Delta S_{cp}$ ). В стационарном состоянии, с учетом предыдущей формулы,

$$\Delta S_c + \Delta S_{cp} = 0$$

или

$$\Delta S_c = -S_{cp}.$$

Величина  $\Delta S_c > 0$ , поскольку внутри системы протекают необратимые процессы. Значит, для поддержания стационарного

состояния живой организм должен обмениваться с окружающей средой так, чтобы энтропия в результате этого обмена понижалась ( $\Delta S_c < 0$ ). Уменьшение энтропии происходит, например, при синтезе высокомолекулярных соединений из низкомолекулярных. Живые организмы потребляют эти высокомолекулярные соединения в процессе питания.

Иными словами, для поддержания в равновесии такой упорядоченной системы, как живой организм, требуется добавочное разупорядочение материи в другой системе. При энергообмене, например, происходит расщепление глюкозы до  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ , которое характеризуется возрастанием энтропии и т. п.

С точки зрения термодинамики человек является *изотермической тепловой машиной*. Механизм действия мускулов до конца не выяснен, но уже то, что коэффициент полезного действия их достигает 20—30% при разности температур тела человека и окружающей среды всего в 10—20 К, говорит о невозможности рассматривать организм как обыкновенную тепловую машину\*.

Человек получает энергию при окислении пищи. Так, например, один килограмм масла дает 33000 кДж, килограмм риса — 12000 кДж, килограмм картофеля — 3000 кДж и т. д. Для поддержания нормальной жизнедеятельности человеку требуется в среднем 7000—10000 кДж в день. Установлено, что лишь 20—40% всей подведенной химической энергии  $\Delta E$  идет на совершение внешней работы  $\Delta A$ , а остальная часть превращается во внутреннюю энергию (поэтому при физических нагрузках организм греется). С точки зрения механики тепло, выделившееся в организме, является бесполезным, и коэффициент полезного действия мускулов равен отношению произведенной ими работы ко всей подведенной химической энергии

$$\eta = \frac{\Delta A}{\Delta E}.$$

Мышцы, как и другие тепловые машины, совершают работу по необратимому циклу.

\* \* \*

В заключение этого раздела отметим, что термодинамический и статистический методы охватывают один и тот же круг вопросов, поэтому можно говорить об едином термостатическом методе рассмотрения явлений природы.

---

\* Если бы человек являлся обычной тепловосиловой машиной, то уже при температуре воздуха 36—37 °С его коэффициент полезного действия был бы равен 0 (см. формулу 3.20).

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И УПРАЖНЕНИЯ

1. В поле зрения микроскопа находятся микроорганизмы; наблюдается ли при этом их броуновское движение?

2. Почему даже у здоровых людей при попадании их в высокогорные районы (на высоту 3500 м и более) появляется одышка, головокружение и сердцебиение?

3. При увеличении температуры объем стеклянной трубки термометра тоже увеличивается. Как при этом изменяется внутренний объем трубки? Как это влияет на показания термометра?

4. Какие физические явления и свойства веществ используются в повседневной жизни для приблизительного определения температуры?

5. Согласно газовому закону, если поместить в литровые банки по одному молю  $O_2$  и  $H_2$  при одинаковой температуре, то давление в обеих банках будет одинаковым. Как это может быть? Ведь хотя количество молекул  $O_2$  и  $H_2$  одинаково, молекулы кислорода много тяжелее. Не будут ли они производить большее давление, чем легкие молекулы водорода?

6. Если тепловая энергия дополнительно поступает в вещество, то всегда ли оно будет нагреваться?

7. Почему в грелках обычно используют воду?

8. Можно ли охладить комнату, оставив открытой дверь холодильника?

9. Почему у Луны нет атмосферы?

10. На каких явлениях основана работа ряда пневматических и гидравлических устройств (газовый баллон, водонапорный бак и т. п.), преобразующих хаотическое движение молекул газа или жидкости в упорядоченные направленные потоки?

11. Можно ли утверждать, что живые существа не подчиняются второму закону термодинамики?

12. Температура газа, находящегося при давлении в  $10 \text{ Н/см}^2$ , возросла от 0 до  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ . Как изменится давление, если объем газа остается постоянным?

13. Определить молекулярный вес газа, если известно, что при нормальных условиях в  $1000 \text{ см}^3$  содержится 0,1 г.

14. В вакуумной системе получено давление  $10^{-10}$  мм рт. ст. Сколько молекул газа остается в  $1 \text{ см}^3$  при указанном давлении и комнатной температуре?

15. Идеальный газ находится в сосуде при  $T = 300 \text{ К}$  и  $p = 10 \text{ Н/см}^2$ . Как изменится температура и давление, если средняя кинетическая энергия молекул возрастет в 4 раза?

16. Найти кинетическую энергию молекул, содержащихся в 1 г гелия при температуре 300 К.

17. Найти относительное число молекул водорода, скорости которых при температуре 290 К лежат в интервале от 800 до 810 м/с.

18. При каких условиях КПД идеальной тепловой машины мог бы достигнуть 100%?

19. Подсчитать, насколько отличается максимально возможный КПД паровой машины зимой и летом. Пар поступает в машину при 450 К, а выпускается в атмосферу. Температуру воздуха зимой принять равной  $-30^{\circ}\text{C}$ , а летом  $+25^{\circ}\text{C}$ .

20. Найти прирост энтропии, если 1 ккал теплоты перешла от тела с  $T_1 = 300\text{ К}$  к телу с  $T_2 = 301\text{ К}$ .

21. Мышца, действуя с силой 250 кг, сократилась на 2 см. Каков КПД мышцы, если при этом выделилось 20 кал тепла?

22. Гремучая змея реагирует на изменение температуры 0,001 К. Сможет ли она уловить изменение температуры газа в стеклянном сосуде, если увеличить давление в нем на 1 мм рт. ст.? Начальные условия нормальные.

23. Коэффициент полезного действия мышц может достигать 40%. Можно ли сравнить мышцу с тепловой машиной, у которой температура холодильника (минимальная температура) равна температуре тела (т. е.  $37^{\circ}\text{C}$ )?

24. Минутный дыхательный объем человека равен  $8000\text{ см}^3$ . Определить массу насыщенного водяного пара при температуре  $30^{\circ}\text{C}$ , выдыхаемого человеком в течение суток.

25. Воздух на улицах больших городов может содержать в среднем до  $10\text{ мг/м}^3$  окиси углерода за счет выхлопных газов. Определить парциальное давление окиси углерода при температуре  $20^{\circ}\text{C}$ .

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

При определенном воздействии на некоторые тела, например, при трении янтаря о шелк, стекла о мех и т. п., они приобретают способность взаимодействовать друг с другом (притягиваться или отталкиваться) посредством сил, не являющихся гравитационными. Тела, получившие такое свойство, называются *наэлектризованными*, а процесс сообщения этого свойства — электризацией.

Электризация связана с разделением *электрических зарядов*. Узнать о том, что в каком-либо месте пространства имеется электрический заряд, можно лишь по действию его на другой электрический заряд. Электрические заряды могут взаимодействовать на расстоянии — посредством *электрического поля*. Электрическое поле можно определить как особое состояние среды, при котором на электрический заряд, помещенный в любую точку этой среды, действует *электрическая сила*.

Свойства и закономерности неподвижных (статических) электрических зарядов и создаваемых ими полей, а также явления, происходящие в телах под воздействием таких зарядов, изучает *электростатика*.

Движущиеся электрические заряды создают помимо электрического поля также и *магнитное поле*, обнаружить которое можно по силе, действующей на другой движущийся заряд. *Магнитные силы* имеют иную природу, нежели гравитационные и электрические. В то же время электрические и магнитные поля являются компонентами единого *электромагнитного поля*. Раздел физики, который занимается изучением всей совокупности электромагнитных явлений, называется *электродинамикой*. Электродинамика — самый обширный раздел физики. Подавляющее большинство наблюдаемых нами явлений (кроме чисто механического перемещения материальных тел) имеет электромагнитную природу. Дело в том, что каждый атом содержит в себе два сорта электрических зарядов. Заряд,

сосредоточенный в ядре, принято считать положительным, а заряд электронов — отрицательным. Взаимодействие электронов с электронами и ядрами атомов различных веществ в различных условиях лежит в основе атомной физики, физики твердого тела, физики плазмы, химии, физиологии и т. д. Оптические явления, связанные со свойствами фотонов, также имеют электромагнитную природу.

В этой главе изложены только основные понятия и законы электромагнетизма, без знания которых невозможно изучение всех последующих разделов.

## 4.1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЗАРЯДЫ И ПОЛЯ

### 4.1.1. Электрическое поле неподвижных зарядов (электростатическое поле)

Подобно тому, как в механике вводится понятие материальной точки, в теории электричества часто используется понятие точечного заряда. *Два точечных заряда ( $q_1$  и  $q_2$ ), расположенные на расстоянии  $r$  друг от друга (рис. 4.1), взаимодействуют с силой  $F$ , прямо пропорциональной произведению величин зарядов и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними.*

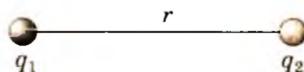


Рис. 4.1

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}. \quad (4.1)$$

Соотношение (4.1) является фундаментальным законом, который носит имя открывшего его французского физика Ш. О. Кулона (1736—1806). В системе СИ заряд измеряется в кулонах, расстояние в метрах, а сила в ньютонах, поэтому коэффициент  $k$  должен быть размерным. В вакууме  $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ , где  $\epsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}^*$  — электрическая постоянная. Если же заряды помещены в диэлектрическую (непроводящую) среду, то сила их взаимодействия ослабляется в некоторое число раз, и закон Кулона приобретает вид

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2}.$$

Величина  $\epsilon$  называется *диэлектрической проницаемостью среды*.

Закон Кулона можно представить в векторной форме

\* Здесь  $\Phi$  обозначает единицу электрической емкости — фарад (см. 4.1.3).

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2} \vec{r}.$$

Направление кулоновской силы зависит от знаков взаимодействующих зарядов. Одноименные заряды отталкиваются, а разноименные — притягиваются.

Количественной характеристикой электрического поля является **вектор напряженности**. Напряженностью называется сила, действующая на единичный положительный заряд, помещенный в данную точку поля, т. е.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}.$$

В случае поля точечного заряда абсолютная величина напряженности определяется выражением

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2},$$

где  $r$  — расстояние от заряда до точки, в которой определяется напряженность.

Электрические поля обладают свойством **суперпозиции**, которое заключается в том, что напряженность поля, создаваемого несколькими зарядами, равна сумме напряженностей, создаваемых каждым из них:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots = \sum_{i=1}^N \vec{E}_i.$$

На рис. 4.2 представлен пример такого сложения.

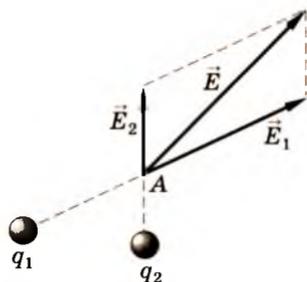


Рис. 4.2

Во многих случаях оказывается полезным графическое представление электростатических полей, для чего вводятся **линии напряженности**. Эти линии проводятся так, что направление касательной к любой их точке совпадает с направлением вектора напряженности, а их плотность (густота) пропорциональна величине напряженности. На рис. 4.3 представлены линии напряженности некоторых электростатических полей.

Помимо вектора напряженности, электрическое поле характеризуют также вектором **электрической индукции** (или вектором **электрического смещения**), который связан с вектором  $\vec{E}$  соотношением

$$\vec{D} = \epsilon\epsilon_0 \vec{E}. \quad (4.2)$$

Из соотношения (4.2) следует, что в вакууме ( $\epsilon = 1$ ) эти векторы имеют одинаковое направление и пропорциональны друг другу

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E}.$$

В электростатике очень важное место занимает соотношение, называемое *теоремой Гаусса*. Эта теорема гласит, что *поток вектора электрического смещения через замкнутую поверхность равен заряду, находящемуся внутри этой поверхности*. Потоком вектора смещения  $\Phi_D$  называется число линий смещения, пронизывающих эту поверхность  $S$ . Если вектор перпендикулярен поверхности, то поток определяется просто произведением  $\Phi_D = DS$ . Такой случай имеет место, когда точечный заряд помещен в центр сферы (рис. 4.4). Докажем теорему Гаусса для этого частного случая.  $D = \epsilon_0 \epsilon E = \frac{1}{4\pi} \frac{q}{r^2}$ .  $S = 4\pi r^2$ .  $\Phi_D = DS = \frac{1}{4\pi} \frac{q}{r^2} \cdot 4\pi r^2 = q$ .  $\Phi_D = q$ .

Из этого же рисунка видно, что поток не изменится, если поверхность будет произвольной. В общем случае поток вектора смещения определяется интегралом по всей замкнутой поверхности от величины  $(D, dS)$ , где  $dS$  — бесконечно малый элемент поверхности. За направление  $dS$  принимается направление внешней нормали  $\vec{n}$  (рис. 4.5). С учетом этого теорему Гаусса можно записать в виде

$$\oint_S (\vec{D}, \vec{dS}) = q,$$

где  $\oint_S$  означает интегрирование по замкнутой поверхности  $S$ .

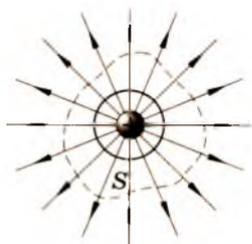


Рис. 4.4

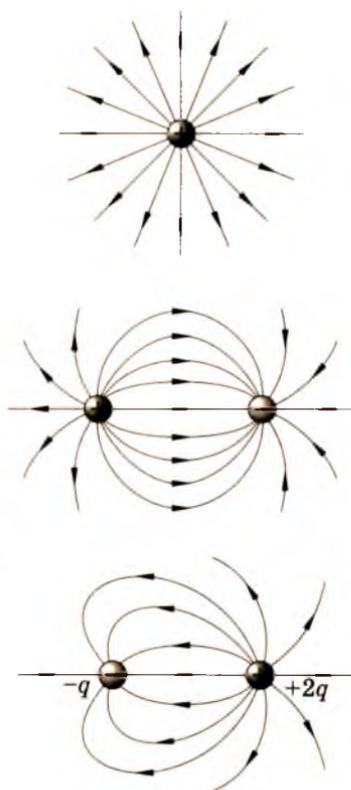


Рис. 4.3

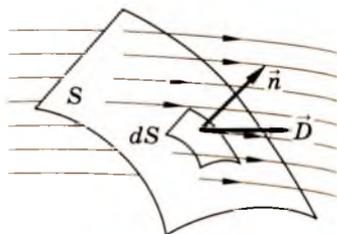


Рис. 4.5

Очевидно, что для вектора напряженности справедлива аналогичная зависимость:

$$\oint (\vec{E}, \vec{dS}) = \frac{q}{\epsilon\epsilon_0}.$$

На рис. 4.6 в подтверждение этой теоремы показано, что поток индукции через замкнутую поверхность, внутри которой отсутствуют электрические заряды, равен нулю.

С помощью теоремы Гаусса можно достаточно легко рассчитать напряженность и электрическое смещение некоторых электростатических полей. Определим напряженность поля, создаваемого бесконечной равномерно заряженной плоскостью (поверхностная плотность заряда  $+\sigma$ ) (рис. 4.7). Из соображений симметрии следует, что векторы напряженности перпендикулярны заряженной плоскости и параллельны друг другу. Представим цилиндр, образующие которого параллельны векторам напряженности, а основания параллельны заряженной плоскости (рис. 4.7). Тогда линии напряженности будут пересекать замкнутую поверхность цилиндра только через основания площадью  $S$ . Согласно теореме Гаусса,  $\Phi_E = \oint (\vec{E}, \vec{dS}) = E \cdot 2S =$   
 $= \frac{q}{\epsilon\epsilon_0} = \frac{\sigma S}{\epsilon\epsilon_0}$ , откуда

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon\epsilon_0}.$$

Как видно, напряженность поля, создаваемого равномерно заряженной плоскостью, не зависит от расстояния до плоскости, т. е. всюду одинакова. Такое поле называется *однородным*. Также однородным является поле между двумя разноименно заряженными плоскостями с одинаковой поверхностной плотностью заряда (рис. 4.8). Сплошные линии напряженности принадлежат положительно заряженной плоскости, штриховые — от-



Рис. 4.6

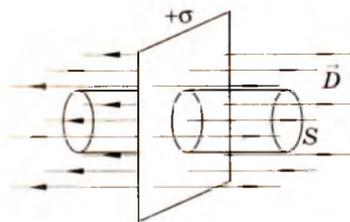


Рис. 4.7

рицательно заряженной. Из рисунка легко убедиться, что между плоскостями напряженность поля

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon\epsilon_0}, \quad (4.3)$$

а во всем остальном пространстве  $E = 0$ .

Теорема Гаусса показывает, что линии напряженности и смещения электростатического поля начинаются и оканчиваются только на электрических зарядах.

Иными словами, электрические заряды являются источниками электростатического поля. Ниже мы увидим, что линии напряженности магнитного поля замыкаются сами на себя — магнитное поле не имеет источников в виде магнитных зарядов.

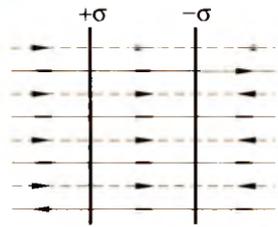


Рис. 4.8

### 4.1.2. Потенциал электростатического поля

На электрический заряд, помещенный в электрическое поле, всегда действует сила, поэтому при перемещении электрических зарядов будет совершаться работа. Подсчитаем работу по перемещению заряда  $q'$  в поле заряда  $q$ . В общем случае работа определяется выражением  $dA = (\vec{F}, d\vec{S})$ , которое применительно к полю точечного заряда можно раскрыть следующим образом:

$$dA = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{qq'}{r^2} dr \cos \alpha = q'(\vec{E}, \vec{dr}). \quad (4.4)$$

Тогда работа по перемещению заряда  $q'$  из положения 1 в положение 2 (рис. 4.9)  $A_{12} = q' \int_{r_1}^{r_2} (\vec{E}, \vec{dr}) = \frac{qq'}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \int_{r_1}^{r_2} \left(\frac{dr}{r^2}\right) = \frac{qq'}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)$ , т. е. в итоге

$$A_{12} = \frac{qq'}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{1}{r_1} - \frac{qq'}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{1}{r_2}.$$

Как следует из этого выражения, работа по перемещению заряда в электрическом поле не зависит от формы пути, по которому она совершается. Это означает, что *электростатическое поле*, как и гравитационное, является *потенциальным*. Поскольку в поле потенциальных сил работа по перемещению тела из одного энергетического состояния в другое равна разности потенциальных энергий в первом и втором состояниях ( $A_{12} = U_1 - U_2$ ), то величина

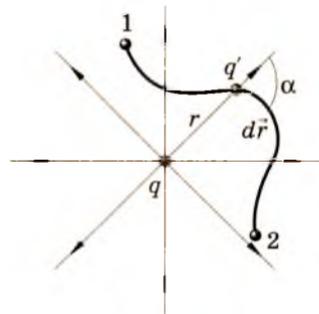


Рис. 4.9

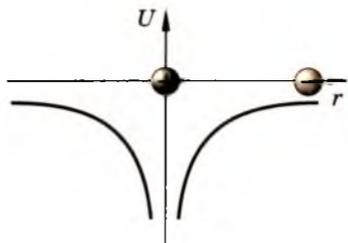


Рис. 4.10

$$U = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{qq'}{r} + \text{const} \quad (4.5)$$

есть потенциальная энергия взаимодействия двух точечных зарядов, или (что равносильно) есть потенциальная энергия заряда  $q'$  в поле заряда  $q$  или наоборот. Если положить, что  $U$  в бесконечно удаленной точке равна нулю ( $r \rightarrow \infty$ ,  $U \rightarrow 0$ ), то константа в выражении (4.5) тоже должна быть равна нулю.

Из этого условия и формулы (4.5) следует, что потенциальная энергия взаимодействия разноименных зарядов отрицательна (рис. 4.10).

Отношение потенциальной энергии, которой обладает заряд в электрическом поле, к величине этого заряда называется **потенциалом** электрического поля:

$$\varphi = \frac{U}{q'}. \quad (4.6)$$

Потенциал поля точечного заряда в точке, удаленной на расстояние  $r$ , в соответствии с (4.5) и (4.6), равен

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \cdot \frac{1}{r}.$$

Поскольку  $dA = -dU$  (см. 2.5.3), можно записать, что

$$dA = -q'd\varphi.$$

Воспользуемся этим соотношением для установления связи между потенциалом и напряженностью поля:  $d\varphi = \frac{dU}{q'} = -\frac{dA}{q'}$ .

Из (4.4) следует, что  $\frac{dA}{q'} = E dr$ , откуда

$$E = -\frac{d\varphi}{dr}, \quad (4.7)$$

т. е. напряженность поля равна градиенту потенциала со знаком «минус». Поскольку напряженность есть величина векторная, (4.7) можно записать в виде

$$\vec{E} = -\frac{d\varphi}{dr} \vec{r}_0,$$

где  $\vec{r}_0$  — единичный вектор.

Из всего сказанного видно, что напряженность и потенциал — две взаимосвязанные характеристики электрического поля: напряженность — силовая характеристика, а потенциал — энергетическая.

Вместо линий напряженности для наглядного изображения поля можно воспользоваться поверхностями равного потенциала (эквипотенциальными). *Эквипотенциальной поверхностью* называется геометрическое место точек, обладающих одинаковым потенциалом. Перемещение заряда по эквипотенциальной поверхности не будет сопровождаться совершением работы. С другой стороны, из формулы (4.4) следует, что работа равна нулю, если заряд движется перпендикулярно вектору  $\vec{E}$ , поэтому эквипотенциальные поверхности всегда перпендикулярны линиям напряженности. Эти поверхности принято проводить так, чтобы разность потенциалов между ними была одной и той же. Несколько примеров графического изображения электрического поля с помощью линий напряженности и эквипотенциальных поверхностей (в плоскости рисунка они изображены штриховыми линиями) представлено на рис. 4.11.

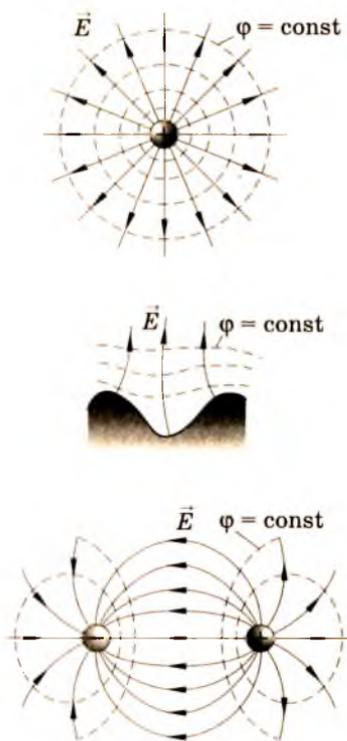


Рис. 4.11

Единицей потенциала в системе СИ служит вольт (В). Один вольт — это потенциал такой точки поля, при перемещении в которую из бесконечности положительного заряда в один кулон совершается работа в один джоуль.

### 4.1.3. Проводники и диэлектрики в электрическом поле

Если проводнику сообщить электрический заряд, то под действием кулоновских сил отталкивания он распределится по поверхности проводника так, что при установившемся равновесии напряженность поля внутри проводника будет равна нулю (рис. 4.12). Из соотношения (4.7) следует, что при  $E = 0$  потенциал всех точек проводника должен быть одинаковым, поэтому поверхность проводника является эквипотенциальной, а линии напряженности перпендикулярны ей. Сказанное в полной мере относится и к проводнику, помещенному во внешнее поле (рис. 4.13).

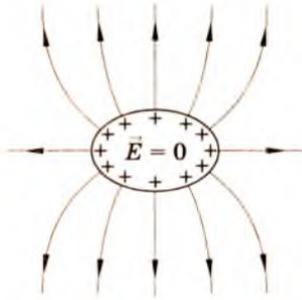


Рис. 4.12

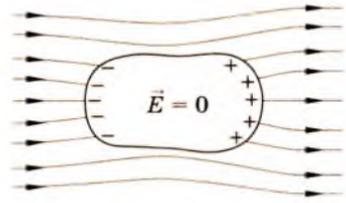


Рис. 4.13

Проводники обладают следующим свойством. Отношение заряда, сообщенного проводнику, к потенциалу, который приобретает этот проводник, если величина постоянная:

$$C = \frac{q}{\phi}.$$

Величина  $C$  называется *электрической емкостью* (или просто емкостью) проводника. В общем случае емкость зависит от размера и формы проводника, а также от расположения окружающих предметов. Но если сблизить два проводника, например металлические пластины, настолько, что электрическое поле будет сосредоточено только между ними (рис. 4.14), то емкость такого устройства, называемого *конденсатором*, уже не будет зависеть от окружающих предметов. Емкость конденсатора определяется выражением

$$C = \frac{q}{\phi_1 - \phi_2} = \frac{q}{V},$$

где  $\phi_1 - \phi_2 = V$  — разность потенциалов между пластинами.

Получим формулу для подсчета емкости плоского конденсатора. Согласно (4.3),  $E = \frac{\sigma}{\epsilon\epsilon_0}$ ; в данном случае  $\sigma = \frac{q}{S}$ , где  $S$  — площадь каждой пластины. С другой стороны, согласно 4.7,  $E = -\frac{d\phi}{dr}$ .

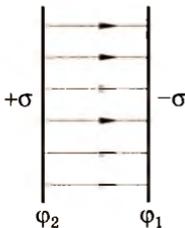


Рис. 4.14

Для однородного поля  $-\frac{d\phi}{dr} = \frac{\phi_2 - \phi_1}{d}$ , где  $d$  — расстояние между пластинами. Тогда  $E = \frac{\phi_2 - \phi_1}{d} = \frac{\sigma}{\epsilon\epsilon_0}$ , и поскольку  $C = \frac{q}{\phi_2 - \phi_1}$ , то окончательно

$$C = \frac{S\epsilon\epsilon_0}{d}.$$

Итак, емкость плоского конденсатора прямо пропорциональна диэлектрической проницаемости среды и площади пластин и обратно пропорциональна расстоянию между пластинами.

В системе СИ единицей емкости является фарад (Ф). Один фарад — это емкость такого конденсатора, в котором при сообщении заряда в один кулон разность потенциалов между обкладками составляет один вольт.

Диэлектрики ведут себя в электрическом поле иначе, чем проводники. В диэлектриках ни положительные, ни отрицательные электрические заряды не могут перемещаться свободно. Они способны лишь незначительно сдвигаться относительно друг друга. Этот процесс называется *поляризацией*. При поляризации в диэлектрике будет возникать внутреннее поле ( $E'$ ), создаваемое смещенными зарядами. Это поле будет ослаблять внешнее поляризующее поле  $E_0$ , в результате чего в диэлектрике установится поле  $\vec{E} = \vec{E}_0 - \vec{E}'$  (рис. 4.15). Величина  $\vec{E}'$  пропорциональна результирующему полю  $\vec{E}$ , т. е.  $E' = \chi E$ . Коэффициент пропорциональности  $\chi$  называется *диэлектрической восприимчивостью вещества*.

Проведем следующие преобразования:  $\vec{E} = \vec{E}_0 - \chi \vec{E}$ ;  $\vec{E}_0 = \vec{E}(1 + \chi)$ . Из введенного ранее понятия диэлектрической проницаемости среды ( $\epsilon$ ) следует, что результирующее поле пропорционально внешнему с коэффициентом  $\epsilon$ , т. е.  $E_0 = \epsilon E$ , и тогда

$$1 + \chi = \epsilon. \quad (4.8)$$

Ранее диэлектрическая проницаемость была введена как показатель ослабления поля кулоновских сил в диэлектрике. Из соотношения (4.8) вытекает, что причиной такого ослабления является поляризация. У большинства диэлектриков  $\epsilon$  составляет несколько единиц, однако существует класс веществ, у которых  $\epsilon$  достигает десятков тысяч. Такие вещества называются *сегнетоэлектриками*. Сегнетоэлектрики состоят из областей самопроизвольной (спонтанной) поляризации, называемых *доменами*. Большие значения  $\epsilon$  связаны с тем, что во внешнем поле все домены ориентируются по полю, а это приводит к максимальной поляризации. Сегнетоэлектрики могут оставаться поляризованными и после выключения внешнего поля.

Сегнетоэлектрические свойства сохраняются лишь в определенном температурном интервале. Для каждого сегнетоэлектрика существует характеристическая температура, называемая точкой Кюри, выше которой сегнетоэлектрические свойства исчезают.

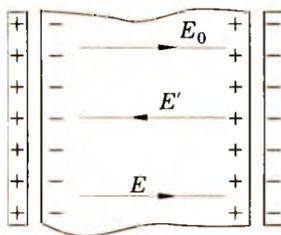


Рис. 4.15

#### 4.1.4. Биопотенциалы

В клетках живых организмов концентрация положительных и отрицательных ионов отличается от концентрации ионов в окружающей клетку среде. В результате этого между наружной и внутренней областями клетки возникает разность потенциалов. Эти потенциалы называются **биопотенциалами** покоя. Биопотенциалы отдельных клеток, составляющих определенную ткань, суммируются между собой. Результирующую разность потенциалов можно измерить с помощью достаточно чувствительных электроизмерительных приборов. С этой целью на определенные участки тела накладываются электроды, обеспечивающие хороший электрический контакт.

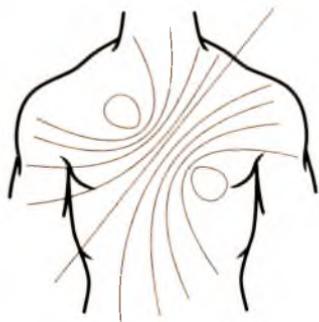


Рис. 4.16

Наряду с биопотенциалами покоя существуют биопотенциалы действия, которые возникают при переходе клетки из невозбужденного состояния в возбужденное. Иными словами, биопотенциалы действия образуются в связи с процессом возникновения и распространения возбуждений. На рис. 4.16 представлены эквипотенциальные поверхности биопотенциалов, возникающих при работе сердца.

Регистрация биопотенциалов занимает важное место в физиологических исследованиях. В частности, для диагностики различных заболеваний измеряются и анализируются биопотенциалы мышц (электромиография), головного мозга (энцефалография) и сердца (электрокардиография).

## 4.2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ

### 4.2.1. Электрический ток

Свободные электрические заряды способны перемещаться на макроскопические расстояния. **Направленное движение электрических зарядов называется электрическим током.** Численно электрический ток характеризуется величиной заряда, прошедшего за единицу времени через поперечное сечение какого-либо проводника:

$$I = \frac{dq}{dt}. \quad (4.9)$$

Эта величина называется **силой тока**. В системе СИ она измеряется в амперах.

В физике часто используется также понятие плотности тока

$$J = \frac{dI}{dS},$$

где  $dS$  — поперечное сечение.

Электрический ток называется постоянным, если он не изменяется со временем.

Рассмотрим некоторые законы постоянного тока в металлах. Согласно классической теории строения металлов, их можно представить в виде жесткой пространственной решетки из положительных ионов, «погруженной» в электронный газ. Свободные электроны в металле, составляющие электронный газ, в обычных условиях движутся хаотически с некоторой средней скоростью  $\bar{v}$ . Поскольку при хаотическом движении все направления движения равновероятны, никакого электрического тока не возникает. Если наложить внешнее электрическое поле, то у всех электронов появится составляющая скорости  $v$ , направленная против этого поля. Электроны приобретут направленное движение, т. е. возникнет электрический ток. Через поперечное сечение проводника  $dS$  за время  $dt$  пройдет заряд  $dq = envdtdt$ , где  $e$  — заряд электрона, а  $n$  — их концентрация. Из этого выражения определим плотность тока

$$J = \frac{dI}{dS} = \frac{dq}{dSdt} = env. \quad (4.10)$$

Скорость направленного движения электронов  $v$  не является постоянной величиной. Из второго закона Ньютона следует, что под действием внешнего поля  $E$  она возрастает со временем линейно:

$$v = \frac{eE}{m} t.$$

Возрастание скорости происходит до тех пор, пока электрон не столкнется с ионом кристаллической решетки. После этого электрон полностью теряет свою скорость, а затем снова начинает ускоряться и т. д. (рис. 4.17). Средний промежуток времени  $\tau$  между двумя столкновениями можно найти как отношение средней длины свободного пробега (среднего расстояния, которое проходят электроны без столкновения)  $\bar{l}$  к средней скорости хаотического движения  $\bar{v}$ :  $\tau = \frac{\bar{l}}{\bar{v}}$ . Максимальная скорость направленного движения

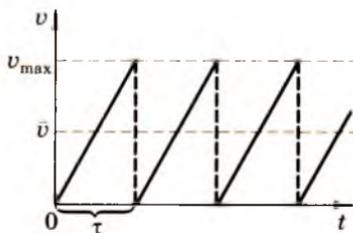


Рис. 4.17

электронов составляет  $v_{\max} = \frac{eE}{m} \tau = \frac{e\bar{l}}{m\bar{v}} E$ . Средняя скорость направленного движения составляет  $\frac{1}{2} \bar{v}_{\max}$  (см. рис. 4.17). С учетом этого выражение (4.10) запишем в виде

$$J = \frac{e^2 n \bar{l}}{2m\bar{v}} \cdot E. \quad (4.11)$$

Величину  $\sigma = \frac{e^2 n \bar{l}}{2m\bar{v}}$  называют *удельной проводимостью*. Наряду с ней вводится обратная ей величина — удельное сопротивление  $\rho$ :

$$\rho = \frac{1}{\sigma}.$$

Используя выражение для удельной проводимости, запишем (4.11) в виде

$$J = \sigma E. \quad (4.12)$$

Соотношение (4.12) представляет собой закон Ома в дифференциальной форме. Убедимся, что оно эквивалентно известному выражению закона Ома в интегральной форме:

$$I = \frac{V}{R}.$$

Для этого умножим обе части уравнения (4.11) на площадь сечения проводника и произведем следующие преобразования, выразив напряженность  $E$  через разность потенциалов  $V$  и расстояние  $d$ :  $JS = I = \sigma SE = \sigma S \frac{V}{d} = \frac{S}{\rho d} V$ . Легко понять, что полное сопротивление проводника прямо пропорционально его удельному сопротивлению и его длине, и обратно пропорционально поперечному сечению, т. е.  $\rho \frac{d}{S} = R$ , поэтому  $I = \frac{V}{R}$ .

Аналогично можно обосновать и закон Джоуля—Ленца, который в дифференциальной форме имеет вид

$$W = \sigma E^2$$

— энергия  $W$ , выделяемая в единице объема проводника (плотность энергии за единицу времени) при прохождении электрического тока, равна произведению удельной проводимости  $\sigma$  на квадрат напряженности электрического поля  $E$ . В интегральной форме этот закон записывается как

$$W = \frac{V^2}{R}.$$

Для поддержания постоянного тока в замкнутой цепи необходимо поддерживать в ней постоянную разность потенциалов.

Это можно осуществить, если какие-либо сторонние силы будут совершать работу по разделению электрических зарядов, т. е. служить источником тока. На рис. 4.18 представлена механическая модель замкнутой электрической цепи. Электрические заряды, подобно шарикам, скатывающимся из точки 1 в точку 2, движутся из области высокого потенциала в область с более низким потенциалом. Для непрерывного движения шариков их нужно поднимать из точки 2 в точку 1, т. е. совершать стороннюю работу. Работа, которую совершают сторонние силы в замкнутой электрической цепи над единичным зарядом, называется электродвижущей силой (ЭДС) источника тока  $\varepsilon^*$ . Величина ЭДС равна разности потенциалов между разомкнутыми клеммами источника. В связи с этим закон Ома для полной цепи можно записать в виде

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r},$$

где  $R$  — сопротивление внешней части цепи, а  $r$  — внутреннее сопротивление источника.

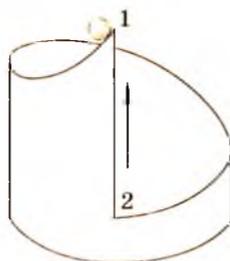


Рис. 4.18

### 4.2.2. Магнитное поле

В самом начале главы уже упоминалось, что между движущимися зарядами возникают силы магнитного взаимодействия. Посредством магнитных сил взаимодействуют и проводники, по которым протекает электрический ток (рис. 4.19). На элемент проводника с током  $I_1$ , имеющий длину  $dl$  и расположенный на расстоянии  $r$  от другого параллельного ему проводника с током  $I_2$ , будет действовать магнитная сила, величина которой определяется законом Ампера (1775—1836):

$$dF = k \frac{I_1 I_2 dl}{r}.$$

Аналогично понятию электрического поля вводится понятие магнитного поля, как особого состояния среды, проявляющегося в действии магнитных сил. Силовой характеристикой магнитного поля служит магнитная индукция  $\vec{B}$ . Величина ин-

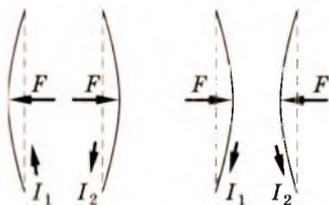


Рис. 4.19

\* Природа ЭДС может быть разной. Например, в гидроэлектростанциях — это энергия воды, в аккумуляторах — электрохимическая и т. д.

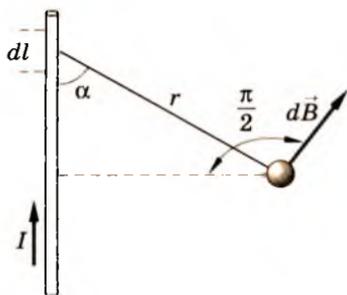


Рис. 4.20

дукции поля, созданного бесконечно длинным прямолинейным проводником, по которому течет ток  $I$ , на расстоянии  $r$  от проводника в системе СИ определяется формулой

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r},$$

где  $\mu_0$  — *магнитная постоянная*. В системе СИ  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^7$  Н/м<sup>2</sup>.

В общем случае индукция магнитного поля может быть найдена по закону Био—Савара—Лапласа (рис. 4.20):

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I dl \sin \alpha}{r^2}.$$

В системе СИ единицей индукции магнитного поля служит 1 тесла. Индукцию в 1 тесла имеет поле, созданное бесконечно длинным проводником, в котором протекает ток, численно равный  $\frac{\mu_0}{2\pi}$  ампер, в точке, удаленной от проводника на 1 м.

Индукция магнитного поля есть величина векторная. Ее направление определяется по правилу правого винта: если направлению тока сопоставить поступательное движение винта, то вращение его головки укажет направление вектора  $\vec{B}$ . Магнитное поле, как и электрическое, можно представить графически с помощью линий индукции. Магнитные поля для двух типичных конфигураций проводников — прямого провода и соленоида — изображены на рис. 4.21.

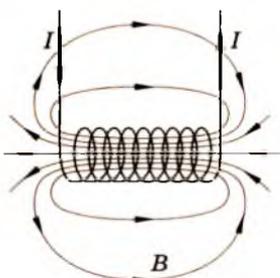
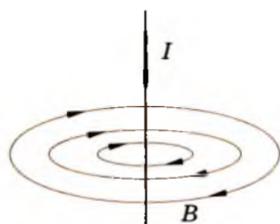


Рис. 4.21

Наряду с величиной  $\vec{B}$  магнитное поле характеризуется также вектором напряженности  $\vec{H}$ . В вакууме  $\vec{B}$  и  $\vec{H}$  связаны соотношением

$$\vec{B} = \vec{\mu}_0 \vec{H}.$$

В веществе магнитное поле меняется в некоторое число раз и последнее соотношение записывается в виде

$$B = \vec{\mu} \vec{H}.$$

Безразмерная величина  $\mu$  называется *магнитной проницаемостью*.

Увеличение магнитного поля в веществе можно объяснить на основании идеи

Ампера о существовании молекулярных токов. Ампер предположил, что на молекулярном уровне в веществе происходит движение микроскопических заряженных частиц по замкнутым траекториям, которое и порождает «молекулярные» магнитные поля. Такое поле принято характеризовать магнитным моментом  $\vec{P}_m$ :

$$\vec{P}_m = IS\vec{n},$$

где  $I$  — ток по замкнутому контуру (обозначен штриховой линией на рис. 4.22),  $S$  — площадь, охваченная этим контуром, а  $\vec{n}$  — перпендикуляр к этой площади. Во внешнем магнитном поле  $\vec{B}$  собственные магнитные моменты атомов будут ориентироваться по полю, что и приводит к увеличению результирующего поля в веществе:

$$\vec{B} = \mu\vec{B}_0 = \mu\mu_0\vec{H}.$$

Однако не все атомы и молекулы имеют собственный магнитный момент. Так, несколько упрощая реальную картину, можно представить, что если в атоме есть два электрона, вращающихся в разные стороны, то их суммарный момент равен нулю. В таком атоме, если поместить его во внешнее магнитное поле, будет индуцироваться магнитный момент, направленный против поля.

Таким образом, все вещества восприимчивы к действию магнитного поля и поэтому называются *магнетиками*. Если атомы данного вещества не обладают собственным магнитным моментом, то оно называется *диамагнетиком*. Значение магнитной проницаемости для таких материалов несколько меньше единицы. Вещества, атомы которых имеют собственный магнитный момент, характеризуются значением  $\mu$ , превышающим единицу. Такие магнетики называются *парамагнетиками*.

В обычном состоянии магнитные моменты атомов в парамагнетике располагаются хаотически, и вещество в целом не будет намагничено. Однако есть класс магнетиков, сохраняющих намагниченность и в отсутствии внешнего поля. Такие вещества называются *ферромагнетиками*. К ним относятся железо, никель, кобальт, гадолиний, их сплавы и соединения и др. Обнаружены ферромагнитные свойства и у некоторых полупроводников. Полупроводники-ферромагнетики получили название *ферритов*. Значение магнитной проницаемости ферромагнетиков составляет сотни и тысячи единиц.

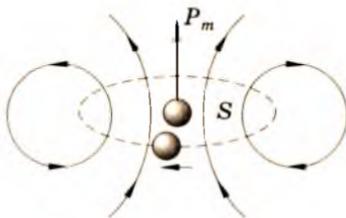


Рис. 4.22

Особые магнитные свойства ферромагнетиков обусловлены тем, что они состоят из областей, в которых все собственные магнитные моменты атомов ориентированы одинаково. Эти области самопроизвольного (спонтанного) намагничивания называются, как и в сегнетоэлектриках, *доменами*. Намагничивание ферромагнетика осуществляется прежде всего за счет ориентации доменов. Ферромагнитные свойства вещества исчезают при температуре, превышающей некоторую характеристическую температуру. Эта температура также называется точкой Кюри. Выше точки Кюри ферромагнетик ведет себя как обычный парамагнетик.

Силы, благодаря которым образуются домены, имеют особую квантово-механическую природу и не являются электромагнитными.

Между электрическим и магнитным полем существует принципиальное различие. Ранее было показано, что электростатическое поле является потенциальным. В таком поле работа не зависит от формы пути, по которому она совершается, а определяется лишь разностью потенциальной энергии в конечном и

исходном состоянии:  $A = q \int_1^2 (\vec{E}, d\vec{l}) = U_2 - U_1$ . Очевидно, что работа по перемещению электрического заряда  $q$  в поле  $\vec{E}$  по замкнутому контуру  $A_3$  равна нулю:  $A_3 = q \oint (\vec{E}, d\vec{l}) = U_2 - U_1 = 0$ , поскольку  $U_2 = U_1$ :

$$\oint (\vec{E}, d\vec{l}) = 0.$$

Величина  $\oint (\vec{E}, d\vec{l})$  называется *циркуляцией вектора напряженности электрического поля*.

Вычислим теперь циркуляцию вектора индукции магнитного поля по замкнутому контуру, охватывающему прямолинейный проводник с током (рис. 4.23):  $(\vec{B}, d\vec{l}) =$

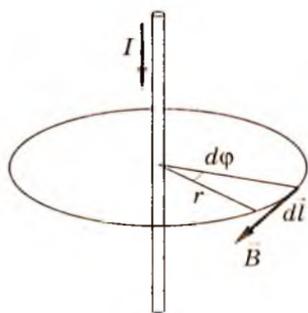


Рис. 4.23

$$Bdl = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} r d\varphi = \frac{\mu_0}{2\pi} I d\varphi. \quad \oint (\vec{B}, d\vec{l}) = \oint \frac{\mu_0 I}{2\pi} d\varphi = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \oint d\varphi = \frac{\mu_0 I}{2\pi} 2\pi = \mu_0 I \text{ или}$$

$$\oint (\vec{B}, d\vec{l}) = \mu_0 I. \quad (4.13)$$

Итак, циркуляция вектора напряженности магнитного поля (а значит, и работа) по замкнутому контуру не равна нулю, а определяется силой тока в проводнике, охваченном контуром. Следовательно, магнитное поле не является

потенциальным. Линии напряженности магнитного поля непрерывны (замкнуты). Такое поле называется вихревым. В вихревом поле поток вектора индукции через любую замкнутую поверхность всегда равен нулю:

$$\Phi_B = \oint (\vec{B}, \vec{dS}) = 0. (4.14)$$

Аналогичное соотношение выполняется и для вектора напряженности

$$\oint (\vec{H}, \vec{dS}) = 0. (4.15)$$

Соотношения (4.14) и (4.15) представляют собой теорему Гаусса для магнитного поля.

### 4.2.3. Электромагнитная индукция

Как сказано выше, магнитное поле порождается движущимися электрическими зарядами. Фарадей (1791—1864) в 1831 г. обнаружил, что между электрическими и магнитными полями существует еще более глубокая связь. Он установил, что при изменении магнитного потока, пронизывающего какой-либо замкнутый контур, в нем возникает электрический ток. Этот ток называется индукционным, а само явление получило название *электромагнитной индукции*. Итак, не только меняющееся электрическое поле вызывает появление магнитного, но и изменение магнитного поля приводит к появлению электрического поля. Фарадей показал, что *величина индуцируемой в контуре ЭДС прямо пропорциональна скорости изменения потока вектора индукции  $\Phi_B$ , пронизывающей этот контур*:

$$\epsilon_{\text{инд}} = - \frac{d\Phi_B}{dt}. (4.16)$$

Знак минус в этой формуле обусловлен правилом Ленца, которое гласит, что индуцируемый ток имеет такое направление, при котором возникающее магнитное поле препятствует изменению магнитного поля, вызвавшего индуцируемый ток.

Для возникновения индукционного тока безразлична причина и способ изменения магнитного потока через контур. Расположим вблизи друг от друга два контура (рис. 4.24), в одном из которых течет изменяющийся ток  $I_1$ . Возникающий при этом изменяющийся магнитный поток будет

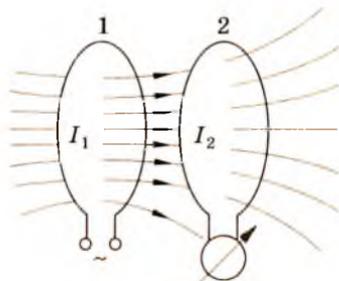


Рис. 4.24

пронизывать контур 2, и в нем возникнет индукционный ток  $I_2$ . Это явление называют *взаимной индукцией*.

Легко также видеть, что при изменении тока в контуре 1, собственный изменяющийся магнитный поток будет пронизывать и сам этот контур, т. е. и в контуре 1 будет индуцироваться ЭДС. Это явление называется *самоиндукцией*. Магнитный поток, связанный с контуром 1, пропорционален току  $I_1$ :

$$\Phi_B = LI_1. \quad (4.17)$$

Коэффициент  $L$  называется *индуктивностью* контура. Если использовать это понятие, то ЭДС самоиндукции можно записать в виде

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -L\frac{dI}{dt}. \quad (4.18)$$

В системе СИ единицей индуктивности служит генри (Гн). Из последнего выражения легко видеть, что индуктивностью в 1 Гн будет обладать такой контур, при изменении тока в котором со скоростью 1 А/с индуцируется ЭДС в 1 В.

#### 4.2.4. Электрические и магнитные свойства биологических тканей

Ткани, из которых состоят организмы, имеют весьма сложную структуру. В состав тканей входят как вещества с очень малой электропроводностью (высокоомные), такие как роговой слой кожи, костные ткани и др., так и хорошо проводящие вещества (низкоомные) — кровь, тканевая жидкость и др. В организме высокоомные и низкоомные участки чередуются друг с другом. Такое чередование может быть как микроскопическим (например, оболочка клетки является изолятором, а протоплазма и межклеточная жидкость относятся к проводникам), так и макроскопическим (например, сухожилия малопроводящи, а мышцы — достаточно хорошие проводники). С электрической точки зрения такие образования подобны конденсаторам. В электрическом поле происходит зарядка структурных микро- и макроэмоостей. Кроме того, наблюдаются и другие поляризационные процессы.

Электрический ток хорошо распространяется по внутренним частям тканей — вдоль кровеносных и лимфатических сосудов, потоков тканевой жидкости и т. п., поэтому сопротивление отдельных участков тела во многом определяется сопротивлением кожи, поскольку она является наиболее высокоомной частью. Электропроводность кожи очень сильно зависит от состояния ее поверхностного слоя. Влажная и нежная кожа проводит электрический ток лучше, чем сухая и грубая. Исследова-

ния показывают, что сопротивление тела человека тесно связано и с состоянием его нервной системы. При возбуждении общая проводимость организма возрастает.

Биологические ткани подвержены влиянию и магнитного поля. В частности, в состав крови входит значительное количество железа, поэтому она может намагничиваться. Внешнее магнитное поле оказывает влияние на биотоки различных тканей организма. При воздействии магнитного поля значительно меняется водный обмен и т. п. В последние годы возникла и бурно развивается новая наука — магнитобиология.

### 4.3. УРАВНЕНИЯ МАКСВЕЛЛА

В 60-х гг. XIX столетия Д. Максвелл (1851—1879), опираясь на известные экспериментальные законы, разработал единую стройную теорию электромагнетизма. Эту теорию Максвелл выразил несколькими уравнениями. Фактически почти все они уже разбирались в двух предыдущих разделах. В систему уравнений Максвелла входят зависимости, отражающие теорему Гаусса для векторов  $\vec{D}$  и  $\vec{B}$ :

$$\oint (\vec{D}, d\vec{S}) = q, \quad (4.19)$$

$$\oint (\vec{B}, d\vec{S}) = 0. \quad (4.20)$$

Третьим уравнением Максвелла является закон электромагнитной индукции Фарадея. Уравнение (4.16) можно записать, используя выражение для  $\epsilon_{\text{инд}} = \oint (\vec{E}, d\vec{l})$ :

$$\oint (\vec{E}, d\vec{l}) = -\frac{d\Phi_B}{dt}. \quad (4.21)$$

Четвертым уравнением Максвелла является обобщенное выражение для циркуляции вектора напряженности магнитного поля (см. (4.13)). Максвелл предположил, что в более общем выражении следует учитывать не только ток проводимости (обусловленный направленным движением зарядов), но и так называемый *ток смещения*. Это понятие можно уяснить на примере разрядки пластин конденсатора (рис. 4.25). Если конденсатор разряжается, то между его обкладками существует переменное электрическое поле, которое порождает переменное магнитное поле. Это поле будет таким же, как если бы между пластинами протекал настоящий ток

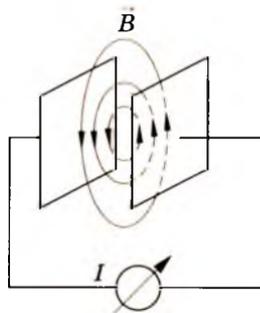


Рис. 4.25

проводимости. Таким образом, с этой точки зрения контур на рис. 4.25 также является замкнутым (в чем и заключается обобщение, предложенное Максвеллом). По Максвеллу ток смещения равен

$$I_{\text{см}} = \frac{dD}{dt} S = \frac{d\Phi_D}{dt}, \quad (4.22)$$

где  $\Phi_D$  — поток вектора  $\vec{D}$ .

С учетом тока смещения четвертое уравнение Максвелла, используя связь между  $\vec{B}$  и  $\vec{H}$  (см. стр. 105) и дополняя (4.13), можно записать так:

$$\oint (\vec{H}, d\vec{l}) = I + \frac{d\Phi_D}{dt}. \quad (4.23)$$

Если к этим уравнениям добавить закон Ома:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (4.24)$$

и выражения, связывающие между собой  $\vec{B}$ ,  $\vec{H}$ ,  $\vec{D}$  и  $\vec{E}$

$$\vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H}, \quad (4.25)$$

$$\vec{D} = \epsilon \epsilon_0 \vec{E}, \quad (4.26)$$

то записанные семь уравнений (4.19), (4.20), (4.21), (4.23), (4.24), (4.25) и (4.26) представляют всю совокупность явлений электромагнетизма.

Уравнения Максвелла отражают не просто неразрывную связь между электрическими и магнитными явлениями. Из этих уравнений вытекает, что электромагнитное поле способно существовать вообще независимо от наличия электрических зарядов и электрических токов. Свойства электромагнитного поля будут рассмотрены подробнее в следующей главе.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И УПРАЖНЕНИЯ

1. Если к нейтральному металлическому шарiku, подвешенному на изолирующей нити, поднести отрицательно заряженную расческу, то вначале шарик притянется к расческе, но соприкоснувшись с ней, оттолкнется. Почему?

2. Почему линии напряженности электрического поля не могут образовывать с поверхностью проводника углов, отличных от  $90^\circ$ ?

3. Как можно приблизительно оценить электрическую емкость человеческого тела?

4. Можно измерить и убедиться, что через лампочку карманного фонарика и обычную лампочку мощностью 40 Вт протекает

ет почти одинаковый ток. Почему же последняя светит гораздо ярче?

5. Почему магнитный диполь может двигаться вдоль линии магнитного поля? Разве сила притяжения, действующая на северный полюс, не будет уравновешиваться силой отталкивания, действующей на южный полюс диполя?

6. Положительный электрический заряд  $10^{-9}$  Кл помещен в центр сферы, по поверхности которой распределен отрицательный заряд  $1,5 \cdot 10^{-9}$  Кл. Изобразить графически линии напряженности результирующего поля такой системы.

7. Во сколько раз электростатическая сила отталкивания больше силы тяготения?

8. Электрон ускоряется разностью потенциалов 10 В. Каков прирост его кинетической энергии?

9. Чему равно отношение кинетической и потенциальной энергии электрона, вращающегося вокруг протона?

10. Электрическая плитка выделяет тепла больше, чем электрическая лампочка, если их соединить параллельно. У какого прибора сопротивление меньше?

11. По двум очень длинным проводникам течет ток 5 А. Расстояние между ними 20 см. Определить напряженность магнитного поля в точке, удаленной на 10 см от каждого проводника, в случае, если токи имеют одинаковое и противоположное направление.

12. Используя условия предыдущей задачи, определить силу, действующую на каждый метр длины проводников.

13. В электрическом органе ската создается напряжение 220 В, при этом через морскую воду в течение  $2 \cdot 10^{-3}$  с протекает ток до 14 А. Какую работу производит скат за один импульс? Какой мощностью обладает электрический орган ската?

14. На запястье и предплечье руки наложены электроды, между которыми создана разность потенциалов 3 В. Каково сопротивление конечности, если при этом протекает ток  $10^{-3}$  А?

# ВОЛНОВЫЕ И КОРПУСКУЛЯРНЫЕ СВОЙСТВА МАТЕРИИ

## 5.1. КОЛЕБАНИЯ

На рис. 5.1—5.4 приведены временные зависимости различных физических величин. Рис. 5.1 представляет электрокардиограмму человека. График на рис. 5.2 отражает изменение со временем среднего размера клеточных ядер. Синусоида на рис. 5.3 описывает колебания маятника. Наконец, на рис. 5.4 представлен процесс выделения кислорода зелеными растениями (заштрихованные промежутки соответствуют ночному времени). Несмотря на существенные различия между ними, все они обладают определенным сходством, а именно — представляют **колебательный процесс**. Среди огромного множества различных колебательных процессов (сокращение сердечной мышцы, движение рук и ног человека при ходьбе, перемещение воздушных масс в атмосфере, движение атомов в кристаллах и т. п.) особое место занимают **периодические колебания**. Колебания называются периодическими, если через один и тот же интервал времени  $T$  полностью воспроизводится движение, совершаемое в предыдущий промежуток времени  $T$ . Величина  $T$  называется **периодом колебания**. Примерами периодических колебаний могут служить первый и третий из представленных выше процессов.

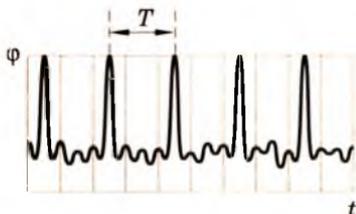


Рис. 5.1

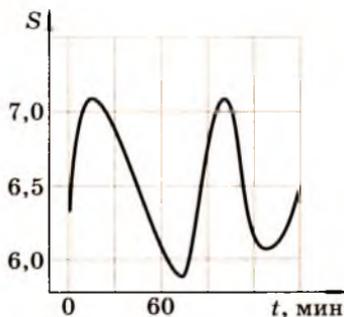


Рис. 5.2

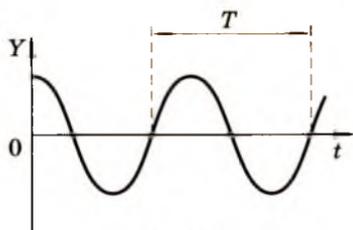


Рис. 5.3

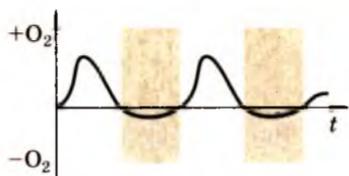


Рис. 5.4

Любые самые сложные периодические колебания могут быть получены суммированием достаточно большого числа наиболее простых — синусоидальных колебаний (они называются еще гармоническими). Например, наложением друг на друга шести синусоид (с различным периодом) (рис. 5.5, а) можно получить достаточно сложную кривую (рис. 5.5, б, сплошная кривая), а при дальнейшем увеличении числа соответствующих синусоид — и кривую, изображенную штриховой линией, которая является частью электрокардиограммы на рис. 5.1.

Гармонический колебательный процесс может быть представлен следующим математическим выражением:

$$y = A \sin(\omega t + \alpha). \quad (5.1)$$

Максимальное отклонение  $y_{\max} = A$  называется амплитудой, а величина, стоящая под знаком синуса, — фазой колебания. Параметр  $\alpha$  является начальной фазой. Легко убедиться, что гармоническому колебанию, представленному на рис. 5.6, соответствует начальная фаза  $\alpha = \frac{\pi}{2}$ . Величина  $\omega$  называется *круго-*

а)



б)

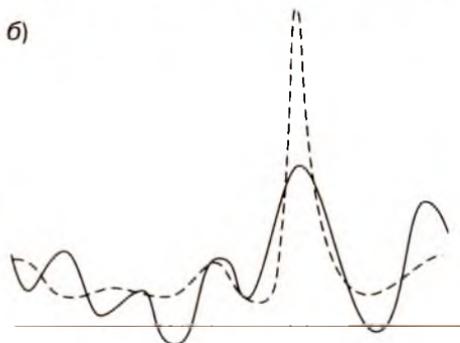


Рис. 5.5

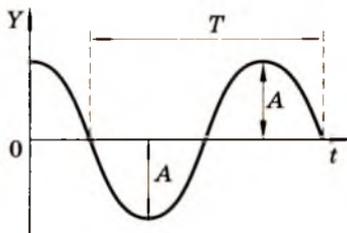


Рис. 5.6

**вой частотой.** Круговая частота равна числу полных колебаний, совершаемых за  $2\pi$  секунд:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}.$$

Часто используется величина, обратная периоду

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}, \quad (5.2)$$

которая называется **частотой колебаний**. Частота  $\nu$  измеряется числом полных колебаний, совершаемых в единицу времени. Единицей измерения частоты служит герц (Гц) — частота, при которой за одну секунду совершается одно колебание.

### 5.1.1. Механические колебания

В механике гармонические колебания имеют место при действии упругих сил. Такие силы возникают, например, при деформации пружины (рис. 5.7). Для упругой силы  $F$  характерно то, что она всегда пропорциональна смещению точки от положения равновесия:

$$F = -kx. \quad (5.3)$$

По второму закону Ньютона  $F = ma = m \frac{dv}{dt}$  или  $m \frac{d}{dt} \left( \frac{dx}{dt} \right)$ , откуда получаем дифференциальное уравнение  $-kx = m \frac{d}{dt} \left( \frac{dx}{dt} \right)$ . Его решением является выражение (5.4) (в чем легко убедиться подстановкой):

$$x = A \sin \left( \sqrt{\frac{k}{m}} t + \alpha \right). \quad (5.4)$$

Значения  $A$  и  $\alpha$  определяются начальными условиями. Если при  $t = 0$   $x = 0$ , то  $\alpha = 0$ . Амплитуда может быть найдена как максимальное отклонение в момент времени  $t = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{m}{k}}$ . Из сравнения выражений (5.1) и (5.4) следует, что  $\sqrt{\frac{k}{m}}$  является круговой частотой:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}. \quad (5.5)$$

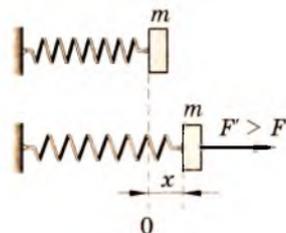


Рис. 5.7

В этом случае период колебаний определяется выражением

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}.$$

Гармонические колебания возникают также и под влиянием квазиупругих

сил, т. е. сил, которые хотя и не являются упругими, но изменяются при отклонении от точки равновесия по закону (5.3). Примером таких колебаний служат колебания математического маятника с малой амплитудой, т. е.  $x \ll l$  (рис. 5.8).

Поскольку в этом случае  $F = -mg \sin \frac{x}{l} = -\frac{mg}{l} x$ , то легко убедиться, что круговая частота колебаний математического маятника равна

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{l}}. \quad (5.6)$$

Механические колебания исключительно широко распространены в природе и технике, начиная с колебаний земной коры и кончая колебанием кварцевой пластинки в точнейших современных часах. Механическим колебаниям подвержены и живые организмы. Подробнее о роли колебаний в биологии будет сказано ниже.

### 5.1.2. Электромагнитные колебания

Синусоидальные колебания напряженностей электрического и магнитного полей возникают в системе, состоящей из конденсатора  $C$  и катушки индуктивности  $L$ . Такая система называется колебательным контуром. Пусть первоначально на обкладках конденсатора находится заряд  $q_0$  (рис. 5.9, а). При замыкании цепи колебательного контура возникнет ток разрядки, который вызовет в катушке ЭДС самоиндукции, препятствующую нарастанию тока. В момент достижения максимального разрядного тока напряженность электрического поля в конденсаторе становится равной нулю, но в катушке возникает магнитное поле (рис. 5.9, б), энергия которого (в силу закона сохранения энергии) равна энергии первоначально существовавшего электрического поля. Затем ток начнет уменьшаться, что

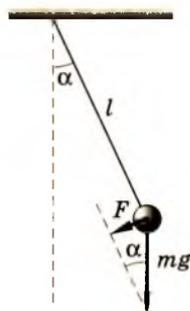


Рис. 5.8

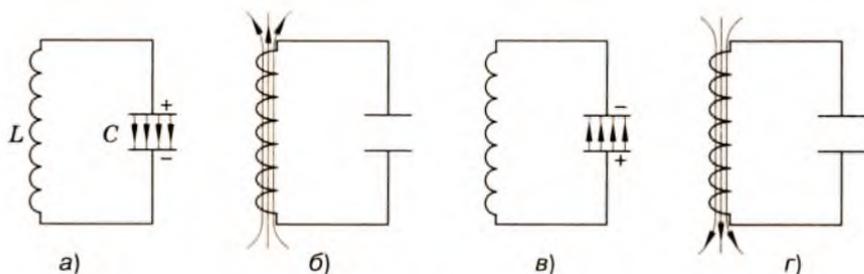


Рис. 5.9

вызовет ЭДС самоиндукции, поддерживающую этот ток. В результате конденсатор перезарядится уменьшающимся разрядным током и энергия колебательного контура опять сосредоточится внутри конденсатора (рис. 5.9, в). Далее снова наступает процесс разрядки конденсатора, но уже в противоположном направлении (рис. 5.9, г) и т. д. Этот периодический процесс изменения во времени электрического и магнитного полей и называется **электромагнитными колебаниями**. Если использовать механическую аналогию, то индуктивность катушки  $L$  играет роль инерционного элемента — пружины. Поэтому колебания в подобной системе также являются гармоническими. В частности, изменение заряда на обкладках конденсатора в колебательном контуре можно представить формулой

$$q = q_0 \cos \omega_0 t,$$

где величина  $\omega_0$  называется **собственной частотой** колебательного контура. Для идеального колебательного контура, состоящего только из индуктивности и емкости, т. е. не имеющего электрического сопротивления,

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (5.7)$$

Очевидно, что в идеальном контуре колебания будут продолжаться сколь угодно долго. В реальных колебательных контурах неизбежны потери на нагревание проводников, поэтому собственные электромагнитные колебания будут затухающими. Затухающие колебания описываются выражением

$$q = q_0 e^{\frac{R}{2L}t} \cos(\omega_0 t + \alpha).$$

Видно, что амплитуда колебаний уменьшается со временем по экспоненте, а быстрота затухания прямо пропорциональна сопротивлению контура  $R$  и обратно пропорциональна индуктивности  $L$  (рис. 5.10).

Для получения незатухающих электромагнитных колебаний необходимо пополнять энергию колебательного контура.

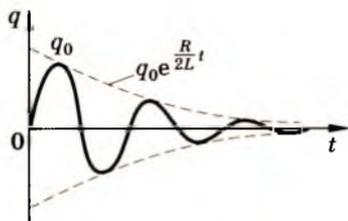


Рис. 5.10

Долгое время для этого использовали трехэлектродную вакуумную лампу (триод). В этом электронном приборе поток электронов между катодом  $K$  и анодом  $A$  можно регулировать, подавая тот или иной потенциал на промежуточный, управляющий электрод — сетку  $S$ . Колебательный контур включен в анодную цепь лампы (рис. 5.11). Между сеткой  $S$  и като-

дом  $K$  включена катушка индуктивности  $L'$ , которая расположена так, что при прохождении изменяющегося тока через индуктивность  $L$  и  $L'$  генерируется ЭДС индукции. Катушка  $L'$  играет роль ключа. ЭДС индукции сообщает сетке положительный потенциал, т. е. «отпирает» лампу всякий раз, когда происходит зарядка верхней пластины конденсатора положительным зарядом, и «запирает» лампу, когда начинается перезарядка емкости. Благодаря тому, что к началу каждого нового периода колебаний из анодной цепи колебательному контуру сообщается энергия за счет источника тока, электромагнитные колебания будут незатухающими. Такое устройство называется генератором незатухающих электромагнитных колебаний.

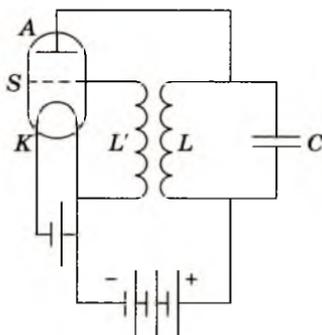


Рис. 5.11

Подобные генераторы являются основной частью всех радиопередающих устройств. Важное место они занимают в биологических исследованиях и медицинской технике. В частности, они используются в аппаратах УВЧ, предназначенных для теплового воздействия на организм, в микроволновых печах и т. п.

Все рассмотренные выше колебания осуществляются с *собственной частотой*, определяемой параметрами колебательного контура (см. (5.2)). Часто в электрической цепи действует внешняя периодическая ЭДС. В этом случае частота колебаний совпадает с частотой вынуждающей ЭДС и колебания называются *вынужденными*. Одним из наиболее важных для техники видов вынужденных колебаний является переменный электрический ток.

### 5.1.3. Переменный электрический ток

Переменным называется такой ток, который изменяется со временем по закону

$$I = I_m \sin(\omega t + \alpha).$$

В частности, переменный ток возникает в замкнутом проводящем контуре при вращении его в однородном магнитном поле (рис. 5.12). Магнитный поток, пронизывающий неподвижный контур, определяется выражением

$$\Phi_B = BS \cos \varphi, \quad (5.8)$$

где  $S$  — площадь контура, а  $\varphi$  — угол между нормалью к плоскости контура и направлением вектора  $\vec{B}$ . При равномерном

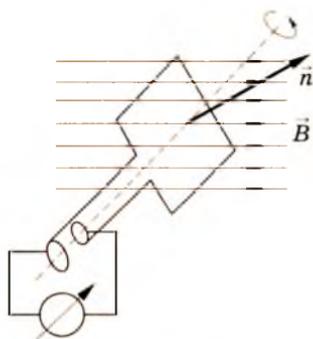


Рис. 5.12

вращении контура с угловой скоростью  $\omega$  угол поворота  $\varphi = \omega t$  и выражение (5.8) можно записать в виде  $\Phi_B = BS \cos \omega t$ .

Видно, что в этом случае магнитный поток, пронизывающий контур, становится переменным во времени, а следовательно, в контуре будет возникать ЭДС индукции:  $\varepsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -\frac{d}{dt}(BS \cos \omega t) = BS\omega \sin \omega t$ , или  $\varepsilon = \varepsilon_m \sin \omega t$ .

В замкнутом контуре при действии переменной ЭДС возникает и переменный электрический ток. Применительно к электрической цепи, изображенной на рис. 5.13, можно записать, что

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{\varepsilon_m}{R} \sin \omega t = I_m \sin \omega t.$$

Из этой формулы следует, что электрический ток, полученный описанным способом, действительно является переменным, подчиняющимся синусоидальному закону.

Переменный ток по сравнению с постоянным обладает многими специфическими свойствами. Так, в отличие от постоянного, он может протекать в цепи, в которую последовательно включен конденсатор (рис. 5.14). С другой стороны, проводники, обладающие заметной индуктивностью  $L$ , представляют для него дополнительное по сравнению с постоянным током сопротивление. Например, ток, протекающий в цепи из прямолинейных проводников, уменьшится, если эти проводники свернуть в соленоид с большим значением  $L$  (рис. 5.15), т. е. в цепи переменного тока увеличение индуктивности эквивалентно введению дополнительного сопротивления.

Переменный ток имеет и еще одну особенность. Изменяющиеся по синусоидальному закону ток и напряжение в общем случае не совпадают по фазе. Пусть, например, электрическая цепь состоит из источника переменного напряжения и конден-

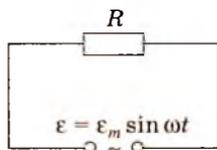


Рис. 5.13

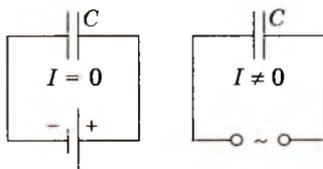


Рис. 5.14

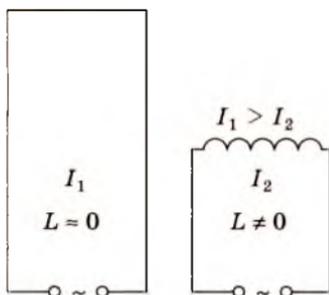


Рис. 5.15



Рис. 5.16

сатора (рис. 5.16). Ток в такой цепи можно представить как изменение со временем заряда на обкладках конденсатора:

$$I = \frac{dq}{dt}.$$

Заряд  $q$  можно выразить через емкость конденсатора и напряжение на его пластинах  $q = CV$ , поэтому

$$I = \frac{d(CV)}{dt} = C \frac{dV}{dt}.$$

Напряжение, как сказано выше, изменяется по синусоидальному закону

$$V = V_m \sin \omega t, \quad (5.9)$$

тогда  $I = CV_m \frac{d \sin \omega t}{dt} = C\omega V_m \cos \omega t = C\omega V_m \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right)$ . Величина, стоящая перед знаком синуса, является максимальным значением тока

$$I_m = \omega CV_m. \quad (5.10)$$

Отсюда

$$I = I_m \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right). \quad (5.11)$$

Из сравнения (5.9) и (5.11) можно заключить, что в цепи с емкостью ток опережает напряжение по фазе на  $\frac{\pi}{2}$ , т. е. на четверть периода (рис. 5.17). Иными словами, максимум тока наступает на четверть периода раньше, чем максимум напряжения.

Если принять, что в цепи переменного тока с емкостью справедлив закон Ома, то из выражения (5.10) следует, что величина  $\frac{1}{\omega C}$  играет роль сопротивления. Эта величина получила название *емкостного сопротивления*:

$$R_C = \frac{1}{\omega C}. \quad (5.12)$$

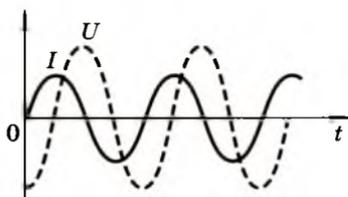


Рис. 5.17

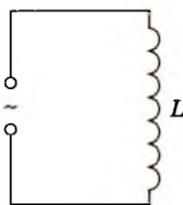


Рис. 5.18

Видно, что емкостное сопротивление обратно пропорционально частоте переменного тока. Для постоянного тока ( $\omega = 0$ ) оно равно бесконечности, и постоянный ток через конденсатор протекать не может.

Рассуждая аналогично, можно установить, что ток в цепи, состоящей из источника переменного напряжения и катушки индуктивности (рис. 5.18), наоборот, отстает по фазе от напряжения на  $\frac{\pi}{2}$  (рис. 5.19).

$$V = V_m \sin \omega t,$$

$$I = I_m \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right).$$

При этом максимальные значения тока и напряжения связаны соотношением  $I_m = \frac{V_m}{\omega L}$ , так что величина

$$R_L = \omega L \tag{5.13}$$

по аналогии с предыдущим случаем называется **индуктивным сопротивлением**. Из уравнения (5.13) следует, что  $R_L$  прямо пропорционально частоте, поэтому для постоянного тока ( $\omega = 0$ ) оно равно нулю.

В самом общем случае, когда цепь содержит омическое сопротивление  $R$ , индуктивность  $L$  и емкость  $C$  (рис. 5.20) для максимальных значений тока и напряжения выполняется закон Ома в виде

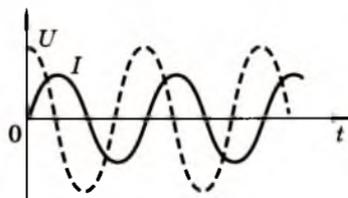


Рис. 5.19

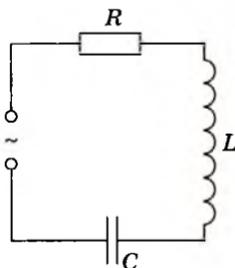


Рис. 5.20

$$I_m = \frac{V_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}, \quad (5.14)$$

где  $\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} = Z$  есть *полное сопротивление (импеданс)*,

$R$  называется *активной составляющей*, а  $\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$  — *реактивной составляющей* полного сопротивления. Видно, что  $Z$  зависит от частоты и соотношения между  $L$  и  $C$ . В частности, при  $\omega L = \frac{1}{\omega C}$  полное сопротивление цепи будет минимальным, а ток, протекающий в ней, — максимальным. Это явление получило название *резонанса напряжений*. Частота  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$  называется резонансной частотой. В соответствии с (5.7) именно такую частоту будут иметь свободные (собственные) колебания в контуре, включающем емкость  $C$  и индуктивность  $L$ . Зависимость амплитуды тока в контуре при различных значениях активного сопротивления от частоты представлена на рис. 5.21\*.

Если индуктивность  $L$  и емкость  $C$  включены в цепи параллельно друг другу (рис. 5.22), то при  $\omega L = \frac{1}{\omega C}$  токи  $I_L$  и  $I_C$  будут равны и противоположно направлены. Это явление называется *резонансом токов*. При резонансе токов полный ток в цепи равен нулю ( $I = I_C - I_L = 0$ ), т. е. сопротивление цепи переменному току становится равным бесконечности.

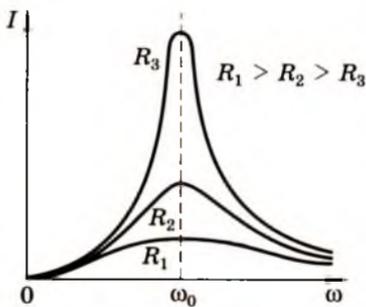


Рис. 5.21

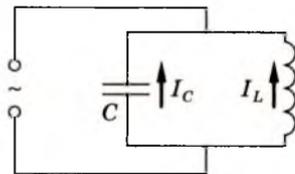


Рис. 5.22

\* Строго говоря, условие резонанса  $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$  справедливо лишь при  $R = 0$ . В цепи, содержащей активное сопротивление  $R \neq 0$ , резонансная частота будет несколько меньше  $\omega_0$ . Однако при малых значениях активного сопротивления различие в частотах незначительно.

Резонансы токов и напряжений широко используются в электротехнике и радиотехнике.

Поскольку в общем случае напряжение и ток не совпадают по фазе, выделяемая в цепи переменного тока, является функцией времени:

$$\begin{aligned} P &= IV = I_m \sin(\omega t + \varphi) V_m \sin \omega t = \\ &= \frac{1}{2} I_m V_m [\cos \varphi + \cos(\pi + \omega t + \varphi)] = \\ &= \frac{1}{2} I_m V_m \cos \varphi + \frac{1}{2} I_m V_m \cos(\pi + 2\omega t + \varphi) = \\ &= \frac{1}{2} I_m V_m \cos \varphi + \frac{1}{2} I_m V_m \cos[2\omega t + (\varphi + \pi)], \end{aligned}$$

где  $\varphi$  — разность фаз между током и напряжением. Итоговая мощность, таким образом, имеет постоянную и переменную составляющие. Графически они представлены на рис. 5.23. Легко видеть, что средняя мощность, выделяемая за период, как раз и равна постоянной составляющей:

$$\bar{P} = \frac{1}{2} I_m V_m \cos \varphi. \quad (5.15)$$

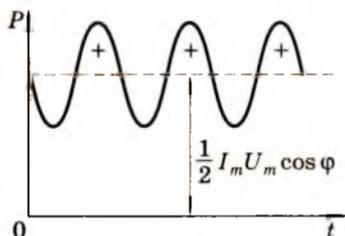


Рис. 5.23

Параметр  $\cos \varphi$  называется здесь *коэффициентом мощности*. Максимальная мощность в цепи переменного тока выделяется в том случае, когда разность фаз между током и напряжением равна нулю ( $\cos \varphi = 1$ ):

$$P_{\max} = \frac{1}{2} I_m V_m.$$

Значения тока и напряжения, связанные с амплитудными значениями соотношениями  $I = \frac{1}{\sqrt{2}} I_m$  и  $V = \frac{1}{\sqrt{2}} V_m$  называются *действующими* значениями. Электроизмерительные приборы в цепи переменного тока (амперметры, вольтметры) показывают именно действующие значения  $I$  и  $V$ . При их подстановке формула мощности приобретает вид

$$P = IV \cos \varphi. \quad (5.16)$$

Увеличение коэффициента мощности представляет очень важную энергосберегающую задачу. В электрических цепях, где  $\cos \varphi$  невелик, для достижения заданной полезной мощности требуется больший ток, что вызывает значительные потери в подводящих проводниках. На практике косинус  $\varphi$  обычно увеличивают включением в цепь конденсаторов, так, чтобы добиться условий, близких к резонансу.

### 5.1.4. Роль колебаний в биологии

Колебания в биологических процессах играют двоякую роль. Во-первых, живые организмы, как и любые материальные тела, сами совершают различные колебательные процессы и подвержены внешним механическим воздействиям. Во-вторых, очень многие биологические процессы носят характер колебаний. Рассмотрим несколько примеров.

Человеческий организм почти постоянно испытывает воздействие внешних колебаний (вибраций). Результат этих воздействий в первую очередь зависит от частоты и амплитуды вынуждающих колебаний. Как следует из рис. 5.24, при постоянной частоте степень воздействия увеличивается с ростом амплитуды, а при постоянной амплитуде — с ростом частоты.

Цифрами на рисунке обозначены графики, характеризующие следующие пределы воздействия: 1 — предел ощущения вибраций; 2 — вибрации заметно ощутимы; 3 — вибрации оказывают раздражающее действие; 4 — вибрации вызывают неприятное ощущение; 5 — вибрации вызывают болезненное состояние.

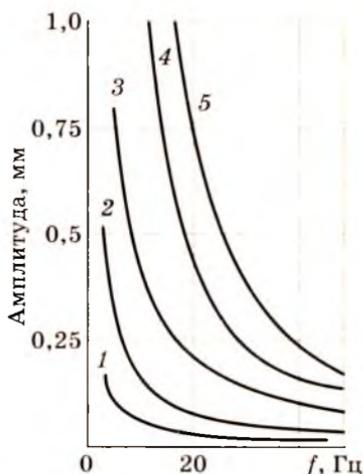


Рис. 5.24

В связи с этим, например, люди, склонные к морской болезни, должны путешествовать в каютах, которые расположены в средней части корабля, а не в носовых или кормовых, поскольку при килевой качке колебания середины корабля минимальны.

Хотя общее биологическое воздействие вибраций на человека зависит от многих факторов (интенсивность и длительность воздействия, направление и место приложения нагрузки и т. п.), наиболее важным параметром является все-таки частота. На некоторые частоты организм реагирует избирательно; так, для сидящего человека наиболее неприятны вертикальные колебания с частотой около 5 Гц. Установлено, что именно эта величина близка к собственной резонансной частоте плечевого пояса.

О биологических эффектах воздействия на человека вибраций различной частоты можно составить представление из таблицы.

Вид колебаний	Биологический эффект	Частота (Гц)			
		$10^{-1}$ 1 10	$10^2$ $10^3$ $10^4$	$10^5$ $10^6$	
		инфразвук	звуковой диапазон	ультразвук	
Шум	Головокружение				
	Нарушение восприятия сообщений				
	Повреждение слуха				
Вибрации	Осязательное восприятие				
	Головокружение и неустойчивость				
	Укачивание				
	Затруднение дыхания				
	Нарушение зрительных восприятий				
	Тепловое действие и разрушение клеток				

Наиболее чувствительным к колебаниям органом является ухо. Оно способно воспринимать колебания в диапазоне 18—18000 Гц. Такие колебания называются звуковыми. Как работает этот столь чувствительный орган?

Первые стадии восприятия звука имеют механическую природу. Ухо решает чрезвычайно сложную задачу — колебания давления воздуха в одну миллионную или даже миллиардную долю атмосферного давления должны оказывать на нервные окончания достаточно большое воздействие, да притом еще требуется точно различать эти колебания по частоте. На рис. 5.25 представлен поперечный разрез уха. Обратите внимание, что ушная раковина играет роль обратного рупора. Она направляет

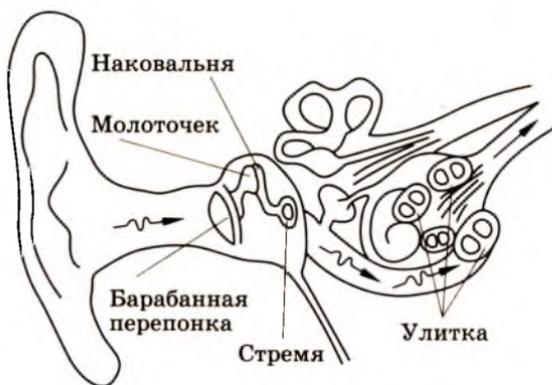


Рис. 5.25

широкий фронт звуковой волны в узкое пространство на барабанную перепонку. Эта тонкая мембрана из живой ткани колеблется под действием звуковой волны. Амплитуда ее колебаний еще недостаточна, чтобы непосредственно восприниматься нервными окончаниями. Поэтому сначала колебания барабанной перепонки передаются трем косточкам, которые в свою очередь связаны с еще одной диафрагмой во внутреннем ухе. Внутри этой части уха звуковая волна распространяется уже в желеобразном веществе. Назначение же косточек и диафрагмы среднего уха состоит в том, чтобы превратить колебания давления воздуха в колебания давления жидкости. И поскольку площадь поверхности барабанной перепонки почти в 30 раз больше, чем площадь поверхности внутренней диафрагмы, а косточки действуют по принципу рычага, давление жидкости во внутреннем ухе уже в несколько десятков раз превышает давление воздуха на барабанную перепонку. Далее звуковые волны поступают в еще одно «устройство», называемое улиткой. Она представляет собой сужающуюся трубку, свернутую в спираль. Разные участки этого длинного канала чувствительны к разным частотам. В каждой определенной области канала резонанс наступает для соответствующих частот. В точках, где возникает резонанс, нервы, прикрепленные к стенкам улитки, испытывают большее воздействие и посылают в мозг сигнал об определенной частоте. Каким образом мозг воспринимает его в виде музыки, речи и т. п. — уже выходит за рамки непосредственно физики.

Количественной характеристикой интенсивности звуковых колебаний является *сила звука*. Она определяется как энергия, которую переносит звуковая волна через перпендикулярную ей единичную площадку в единицу времени. В системе СИ она из-

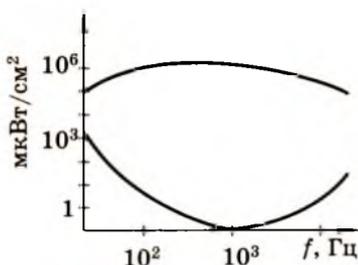


Рис. 5.26

меряется в Вт/м<sup>2</sup>. Наименьшая сила звука, ощущаемая ухом, называется *порогом слышимости*. Зависимость порога слышимости от частоты звуковых колебаний представлена нижней кривой на рис. 5.26. Верхняя кривая на этом рисунке соответствует порогу болевого ощущения.

Уникальной колебательной системой является сердце. Работа его состоит в попеременном синхронном сокращении и расслаблении мышц предсердий и желудочков. Управляет этой работой специальный орган — синусный узел, вырабатывающий синхронизирующие электрические импульсы определенной частоты. При заболевании синусного узла он может быть заменен электронным генератором.

Колебания совершаются и на микроуровне — в различных органеллах клетки (ядро, рибосомы, митохондрии), которые изменяют форму и объем. На рис. 5.2 представлены экспериментально наблюдаемые колебания размера клеточных ядер.

С другой стороны, можно говорить о колебаниях на макроуровне — на уровне популяций и видов в целом. Некоторые биологи поддерживают гипотезу о «волнах жизни», суть которой заключается в том, что наилучшие условия для эволюции вида складываются тогда, когда он существует в колебательном режиме. Обогащение вида более сильными и приспособленными особями в этом случае происходит быстрее, поскольку в фазе убывания численности погибают более слабые индивиды, и в минимуме вид оказывается обогащенным ценными особями. В фазе роста их число еще более возрастает.

Циклический характер имеет фотосинтез (рис. 5.4) и многие другие биологические процессы.

Даже эти немногочисленные примеры приводят к выводу о том, что колебательные процессы занимают в жизни исключительно важное место.

## 5.2. ВОЛНЫ

### 5.2.1. Уравнение волны

Колебания, возникшие в какой-либо точке, способны в некоторых случаях распространяться в пространстве. Процесс распространения колебаний называется *волной*. Наглядным примером такого процесса могут служить волны на воде. В жизни наиболее часто мы имеем дело со звуковыми волнами.

Пусть в точке  $O$  (рис. 5.27) возникли колебания вдоль оси ординат ( $y = A \cos \omega t$ ). Если эти колебания распространяются вдоль оси абсцисс, то в точке  $O'$  на расстоянии  $x$  они придут с запаздыванием на время  $t' = \frac{x}{v}$  (где  $v$  — скорость распространения волны). Колебательный процесс в точке  $O'$  можно представить как  $y = A \cos [\omega(t - t')]$  или

$$y = A \cos \omega \left( t - \frac{x}{v} \right). \quad (5.17)$$

Выражение (5.17) называется **уравнением волны**. Уравнение волны позволяет в любой момент времени определить состояние колебательного процесса в любой точке пространства, т. е. полностью определить волну. В соответствии с (5.17) волна характеризуется амплитудой  $A$ , частотой  $\omega$  и скоростью распространения  $v$ . Волна, описываемая уравнением (5.17), представлена на рис. 5.28.

Геометрическое место точек, колеблющихся в данный момент времени в одинаковых фазах, называется **волновой поверхностью**, а геометрическое место точек, до которых доходят колебания к данному моменту, называется **фронтом волны**. Иными словами, фронт волны является границей, отделяющей часть пространства, охваченного колебаниями, от области, в которой колебания еще не возникли. В однородной среде фронт волны и волновая поверхность имеют одинаковую форму. Если фронт волны представляет собой плоскость, то волна называется **плоской**. Легко видеть, что плоская волна распространяется только в одном направлении, следовательно, уравнение (5.17) представляет плоскую волну. Расстояние, на которое распространяется волна за период, называется **длиной волны**:

$$\lambda = vT.$$

Этот параметр также является важной характеристикой волны. Графически длина волны определяется как расстояние по направлению распространения между двумя ближайшими точками, находящимися в одинаковых фазах, например, между двумя соседними минимумами или максимумами (рис. 5.28).

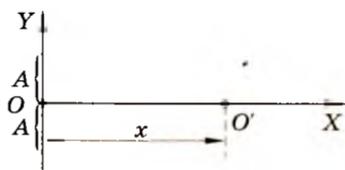


Рис. 5.27

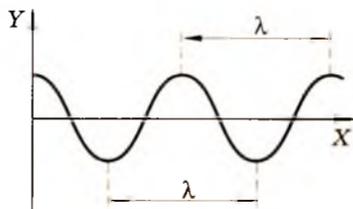


Рис. 5.28

Уравнение волны (5.17) можно записать несколько иначе, если воспользоваться понятиями периода и длины волны:

$$y = A \cos 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right). \quad (5.18)$$

Синусоидальные волны иначе называются *монохроматическими*. Уравнения (5.17) и (5.18) описывают как раз монохроматическую волну. Видно, что такая волна не ограничена ни в пространстве, ни во времени. Отрезки синусоидальных волн, так же как и несинусоидальные волны, не являются монохроматическими, поскольку они могут быть получены только путем сложения определенного числа монохроматических волн различной амплитуды и частоты. Это явление подобно сложению большого числа гармонических колебаний, в результате которого возникает сложное колебание (см. раздел 5.1). Поскольку локализованные в пространстве волны являются суперпозицией большого числа монохроматических волн, их часто называют волновыми пакетами.

В неподвижной среде частота волны задается источником колебаний, а скорость распространения ( $a$  значит, и  $\lambda$ ) зависит от свойств среды. Например, одни и те же звуковые колебания в воде распространяются быстрее, чем в воздухе, поэтому в воде длина звуковых волн больше. Если источник колебаний движется, то частота волны зависит от скорости этого движения: при удалении источника частота волн, доходящих до наблюдателя, уменьшается, а при приближении — возрастает. Это явление называется *эффектом Доплера* (1803—1855) и связано с тем, что скорость распространения волн в среде не зависит от скорости источника, поэтому, если источник удаляется, то за единицу времени наблюдателя достигнут не все минимумы и максимумы, излученные за это время источником, и наоборот. Математически эффект Доплера можно описать формулой

$$\omega' = \omega_0 \left( 1 \pm \frac{v_n}{v} \right), \quad (5.19)$$

где  $v_n$  и  $v$  — скорость источника и скорость волны, а  $\omega_0$  и  $\omega'$  — соответственно частота волны в среде при неподвижном и движущемся источнике. Эффект Доплера часто используется для определения скорости источника волн.

Все волны подразделяются на два вида. Если направление колебаний частиц среды и направление распространения волны перпендикулярны друг другу, то волна называется *поперечной*. Если же эти направления совпадают, то волна будет *продольной*. Волны, созданные механическими источниками колебаний, могут распространяться лишь в упругих средах, причем

в твердых и жидких телах возможны как поперечные, так и продольные волны, а в газах — только продольные. Вот почему при землетрясении все предметы, удаленные от эпицентра, испытывают два удара. Вначале приходит более быстрая продольная волна, а затем поперечная.

### 5.2.2. Электромагнитные волны

Строгое решение уравнений Максвелла приводит к выводу о существовании электромагнитных волн, которые представляют собой распространение в пространстве электромагнитных колебаний, описанных в предыдущем разделе. К такому же выводу можно прийти и путем следующих рассуждений. Пусть в некоторой точке пространства возникло переменное магнитное поле  $\vec{B}$ . Это может произойти, например, при разрядке конденсатора в колебательном контуре. В соответствии с третьим уравнением Максвелла (4.21) в окрестностях этой точки возникнет переменное электрическое поле  $\vec{E}$ , которое в соответствии с четвертым уравнением Максвелла (4.23) породит в соседних точках переменное магнитное поле  $\vec{B}$  и т. д. Словом, от точки 0 будет распространяться электромагнитная волна. Плоская электромагнитная волна изображена на рис. 5.29. Векторы  $\vec{E}$ ,  $\vec{B}$  и  $\vec{v}$  взаимно перпендикулярны и образуют правовинтовую систему. Электрическая и магнитная составляющие электромагнитной волны равноправны и в силу закона сохранения энергии численно равны друг другу. Поэтому электромагнитную волну в равной степени можно представлять как вектором  $\vec{E}$ , так и вектором  $\vec{B}$ \*

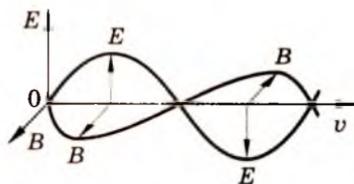


Рис. 5.29

$$E = E_0 \cos \omega \left( t - \frac{x}{v} \right),$$

$$B = B_0 \cos \omega \left( t - \frac{x}{v} \right).$$

Максвелл показал, что скорость распространения электромагнитных волн равна

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \epsilon_0 \mu \mu_0}}. \quad (5.20)$$

\* Установлено, однако, что световое действие оказывает лишь вектор  $\vec{E}$ , поэтому его часто называют световым вектором.



Рис. 5.30

В вакууме  $\epsilon = \mu = 1$ , следовательно  $v_v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$ . Эта константа составляет  $\sim 3 \cdot 10^8$  м/с и совпадает со скоростью света в вакууме ( $c$ ). Последнее обстоятельство и позволило предположить, что свет представляет собой электромагнитные волны. Это предположение полностью подтвердилось. Диапазон частот световых волн лежит от  $4,3 \cdot 10^{14}$  Гц (красное излучение) до  $7 \cdot 10^{14}$  Гц (фиолетовое излучение). В принципе электромагнитные волны могут обладать любой частотой, от нуля до неограниченно большой. Спектр электромагнитных волн представлен на рис. 5.30. Видно, что в этом спектре свет занимает очень узкую область.

Существенное воздействие на живые организмы производит только коротковолновое электромагнитное излучение, начиная с инфракрасного диапазона.

Инфракрасное излучение воспринимается организмами как тепловое. В живой природе инфракрасное излучение иногда играет более важную роль, чем видимый свет. Например, змеи обладают слабым зрением, слухом и обонянием, но очень чувствительны к инфракрасным лучам. Они имеют специальные термочувствительные органы, расположенные между глазами и ноздрями, которые позволяют им ориентироваться в темноте.

Под действием света происходит фотосинтез — превращение воды и углекислого газа в органические соединения — углеводы. Фотосинтез можно представить формулой  $6\text{H}_2\text{O} + 6\text{CO}_2 \xrightarrow[\text{хлорофилл}]{\text{свет}} \text{C}_2\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2$ . Увеличение фотосинтеза является одним из путей повышения урожайности сельскохозяйственных культур.

Ультрафиолетовое излучение с  $\lambda \sim 200\text{—}280$  нм губительно для бактерий, а ультрафиолетовое излучение с  $\lambda \sim 280\text{—}400$  нм оказывает укрепляющее действие на организм человека. Сильное разрушающее действие оказывают рентгеновские и  $\gamma$ -лучи. О биологическом эффекте облучения живых организмов этими лучами подробнее сказано в седьмой главе.

### 5.3. ВОЛНОВЫЕ СВОЙСТВА СВЕТА

Еще в глубокой древности у людей сложилось представление о прямолинейном распространении света. Позднее выяснилось, что свет распространяется прямолинейно только в однородной среде. В общем случае свет проходит от одной точки пространства до другой по такому пути, для преодоления которого требуется минимальное время. Эту закономерность установил в 1662 г. П. Ферма (1608—1665), и она носит название **принципа Ферма**.

Из этого принципа вытекают законы преломления и отражения света:

1. На границе двух сред (1 и 2) падающий, преломленный и отраженный лучи лежат в одной плоскости (рис. 5.31).

2. Угол отражения  $\beta$  равен углу падения  $\alpha$ .

3. Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления для данной пары веществ есть величина постоянная:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n_{12}. \quad (5.21)$$

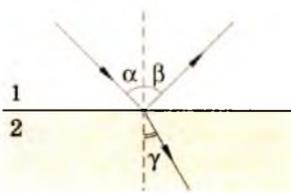


Рис. 5.31

Константа  $n_{12}$  называется **относительным показателем преломления** второй среды по отношению к первой. Если одной из сред является вакуум, то соотношение (5.21) характеризует **абсолютный показатель преломления** вещества  $n$ .

Раздел оптики, основанный на представлении о световых лучах, \* называется **геометрической оптикой**. Законы геометрической оптики, хотя и не вскрывают физической природы световых явлений, оказываются полезными при рассмотрении работы многих оптических приборов (лупы, телескопа, микроскопа фотоаппарата и т. п.). Геометрическая оптика является предельным случаем волновой оптики, когда полагают, что длина световой волны бесконечно мала. За луч света при этом принимается направление движения фронта волны.

Покажем, что закон преломления является естественным следствием волновой природы света, а также выясним физический смысл показателя преломления. Пусть плоская световая волна распространяется со скоростью  $v$  вдоль направления, задаваемого лучами 1 и 2 (рис. 5.32). На рисунке фронт волны изображен отрезком  $OA$ , перпендикулярным направлению рас-

\* Световым лучом называется направление, вдоль которого распространяется свет.

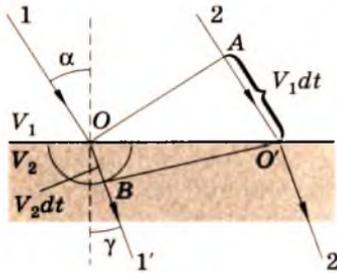


Рис. 5.32

пространения. Из рисунка следует, что пока луч 2 идет от точки  $A$  до точки  $O'$ , луч 1 будет распространяться уже во второй среде со скоростью  $v_2 < v_1$ . Новый фронт волны найдем на основании *принципа Гюйгенса*, который гласит, что *любую точку среды следует рассматривать как точечный источник вторичных волн*. Новый фронт волны является огибающей

вторичных волн. Вторичная волна, соответствующая лучу 1, за время  $dt$  распространится во второй среде на расстояние  $v_2 dt$ , поэтому новый фронт волны во второй среде изобразится отрезком  $BO'$ . Он по-прежнему будет перпендикулярен направлению распространения волны, т. е. лучам  $1'$  и  $2'$ . Из треугольников  $OO'A$  и  $OO'B$  найдем, что  $\frac{v_1 dt}{\sin \alpha} = \frac{v_2 dt}{\sin \gamma}$ , откуда

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{v_1}{v_2}. \quad (5.22)$$

Из сравнения (5.21) и (5.22) следует, что относительный показатель преломления равен отношению скоростей распространения световой волны в граничных средах.

$$n_{12} = \frac{v_1}{v_2}.$$

Очевидно, что абсолютный показатель преломления данной среды определяется соотношением

$$n = \frac{c}{v},$$

где  $c$  — скорость света в вакууме. Поскольку  $v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \epsilon_0 \mu \mu_0}}$  (см.

(5.20)), а  $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$ , то

$$n = \sqrt{\epsilon \mu}. \quad (5.23)$$

Иными словами, абсолютный показатель преломления определяется электрическими и магнитными свойствами вещества.

Прямыми доказательствами волновой природы света являются его *интерференция*, *дифракция* и *поляризация*. Рассмотрим эти явления.

### 5.3.1. Интерференция света

Явление интерференции впервые описал итальянский физик Ф. Гримальди (1618—1663) в «Физико-математическом трактате о свете, цветах и радуге...». Он отметил, что «освещенное тело может сделаться темным, если к тому свету, который оно уже получило, добавить новый свет». Интерференция может наблюдаться только при наложении *когерентных волн*, т. е. таких волн, *которые имеют одинаковую частоту и неизменную во времени разность фаз*. Отдельные возбужденные атомы, составляющие светящееся тело, излучают свет независимо друг от друга, поэтому световые волны, полученные от разных источников или даже от двух достаточно удаленных друг от друга точек одного протяженного источника, не имеют постоянной во времени разности фаз, т. е. некогерентны. Однако атомы, близко расположенные друг от друга, взаимосвязаны и излучают свет одновременно. Это значит, что световые волны, излученные группой таких атомов, например, различными точками малого по размеру источника, когерентны. При экспериментальном наблюдении интерференции когерентные источники часто получают путем деления световой волны, генерируемой одним малым по размеру источником, на две части. На рис. 5.33 изображено так называемое бизеркало Френеля. Световые волны, отраженные от его граней  $AO$  и  $OB$ , порождены одним и тем же точечным источником  $S$ , но формально их можно считать излученными двумя точечными когерентными источниками  $S_1$  и  $S_2$ , которые являются изображениями источника  $S$ . Источники  $S_1$  и  $S_2$  называются мнимыми.

Волны, приходящие в некоторую точку  $A$  (рис. 5.34) от двух когерентных источников, можно представить выражениями

$$E_1 = E_0 \cos \omega \left( t - \frac{x_1}{v} \right) \text{ и } E_2 = E_0 \cos \omega \left( t - \frac{x_2}{v} \right).$$

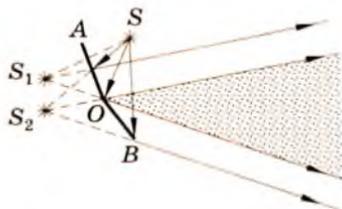


Рис. 5.33

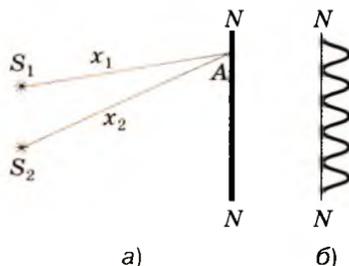


Рис. 5.34

Величина  $E = E_1 + E_2 = 2E_0 \cos \omega \frac{x_2 - x_1}{2v} \cos \omega \left( t - \frac{x_2 + x_1}{2v} \right)$  характеризует волну, возникшую в результате интерференции. Частота этой волны осталась прежней, а ее амплитуду можно представить как  $E'_0 = 2E_0 \cos \omega \frac{x_2 - x_1}{2v} = 2E_0 \cos \pi \frac{x_2 - x_1}{\lambda}$ . Если в данной точке  $\pi \frac{x_2 - x_1}{\lambda} = m\pi$  ( $m = 1, 2, 3$  и т. д.), то  $E'_0 = 2E_0$ , т. е. происходит усиление волны (наблюдается максимум освещенности). Величина  $x_2 - x_1 = \Delta x$  называется геометрической разностью хода. С учетом этого, условие интерференционного максимума можно записать как  $\Delta x = 2m \frac{\lambda}{2}$ . Если интерференция наблюдается не в вакууме, а в среде с показателем преломления  $n$ , то вместо геометрической разности хода следует использовать оптическую разность хода

$$\Delta l = \Delta x n.$$

Тогда в окончательном виде условие максимума запишется как

$$\Delta l = 2m \frac{\lambda}{2}, \quad (5.24)$$

т. е. разность хода должна равняться четному числу полуволн.

Если же разность хода составит нечетное число полуволн, т. е.

$$\Delta l = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}, \quad (5.25)$$

то интенсивность световой волны в точке  $A$  будет равна нулю ( $E'_0 = 0$ ). Это — условие интерференционного минимума. На рис. 5.35 наглядно представлено усиление и гашение когерентных волн.

При перемещении точки  $A$  в пространстве условия минимумов и максимумов будут наступать поочередно, поэтому интерференционная картина будет состоять из чередующихся светлых и темных полос. Распределение освещенности вдоль прямой  $NN$  представлено на рис. 5.34, б.

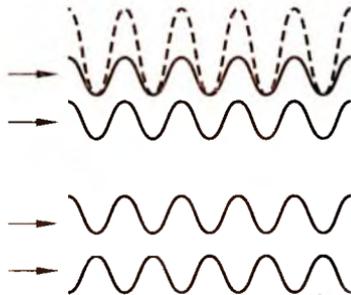


Рис. 5.35

Из выражений (5.24) и (5.25) также следует, что положения минимумов и максимумов зависят от длины волны. Если источники  $S_1$  и  $S_2$  излучают белый свет, то различные длины волн будут усиливаться в разных точках, в результате чего белый свет окажется разложенным в спектр. Это явление можно часто наблюдать в быту при интерференции света в тонких пленках, приме-

ром которых служат масляные пятна на воде, мыльные пузыри и т. п. Схематически тонкая пленка (в разрезе) представлена на рис. 5.36. Между лучами, отраженными от верхней и нижней поверхностей пленки, возникает разность хода, зависящая при неизменном угле падения от толщины пленки в данном месте. Поэтому при одной толщине пленки будет усиливаться, например, красный свет, а при другой — зеленый и т. п. В результате, пленка оказывается окрашенной в радужные цвета.

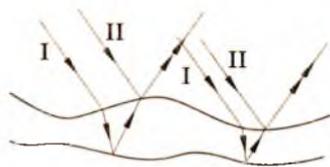


Рис. 5.36

### 5.3.2. Дифракция света

Под дифракцией понимается огибание светом препятствий, т. е. отклонение света от прямолинейного распространения. Например, при прохождении света через очень маленькое отверстие в области геометрической тени возникают чередующиеся светлые и темные полосы (рис. 5.37). Явление дифракции объясняется на основании принципа Гюйгенса—Френеля. Пусть от источника  $S$  распространяется световая волна, которая проходит через отверстие  $DD'$  (рис. 5.38). По принципу Гюйгенса—Френеля каждая точка волнового фронта является источником вторичных когерентных волн, которые будут интерферировать между собой. Разобьем фронт волны, прошедшей через отверстие, на кольцевые зоны (зоны Френеля) так, чтобы лучи, приходящие в точку  $B$  от краев двух соседних зон, имели бы разность хода  $\frac{\lambda}{2}$ . Легко убедиться в том, что, если в отверстие укладываем



Рис. 5.37

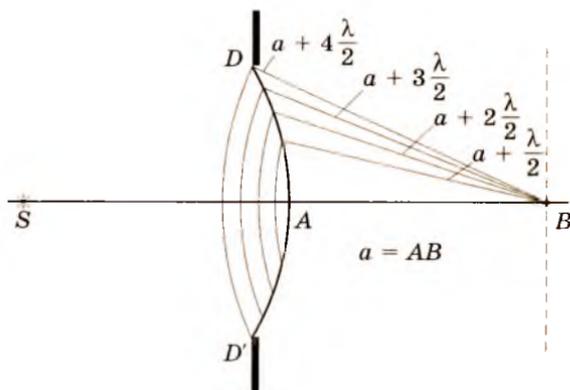


Рис. 5.38

ется четное число зон Френеля, в точке  $B$  будет минимум освещенности, если нечетное число — максимум. В плоскости, перпендикулярной линии  $SB$ , будет наблюдаться картина, подобная изображенной на рис. 5.37.

С помощью зон Френеля можно рассчитать дифракцию плоской световой волны на щели (рис. 5.39). Пусть свет падает перпендикулярно щели. Выясним условия, при которых за щелью под углом  $\varphi$  будет наблюдаться минимум или максимум освещенности. Разность хода между лучами  $1'$  и  $2'$  можно представить в виде

$$\Delta x = b \sin \varphi,$$

где  $b$  — ширина щели. Разобьем фронт падающей на щель волны на  $k$  зон шириной  $b'$  ( $b' = \frac{b}{k}$ ), так, чтобы разность хода между крайними лучами двух соседних зон составляла  $\Delta x' = b' \sin \varphi = \frac{\lambda}{2}$ . Как и в предыдущем случае, при четном числе  $k = 2m$  будет наблюдаться ослабление освещенности, а при нечетном числе  $k = 2m + 1$  — усиление. В общем виде условия дифракционных минимумов и максимумов можно записать соответственно как

$$b \sin \varphi = \pm 2m \frac{\lambda}{2} \text{ и } b \sin \varphi = \pm (2m + 1) \frac{\lambda}{2}. \quad (5.26)$$

На явлениях дифракции и интерференции основана работа очень важного оптического прибора — **дифракционной решетки**. Она состоит из большого числа ( $N$ ) равных по ширине ( $b$ ) прозрачных щелей, разделенных равными по ширине ( $a$ ) непрозрачными промежутками (рис. 5.40). Величина  $a + b = d$  называется **периодом решетки**. В дифракционной решетке накладываются друг на друга два явления: **дифракция** света на единичной щели и **интерференция** света, проходящего через множество щелей.

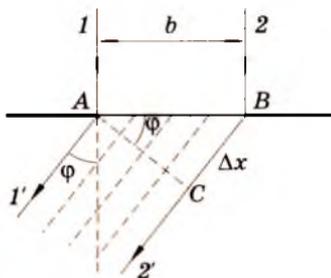


Рис. 5.39

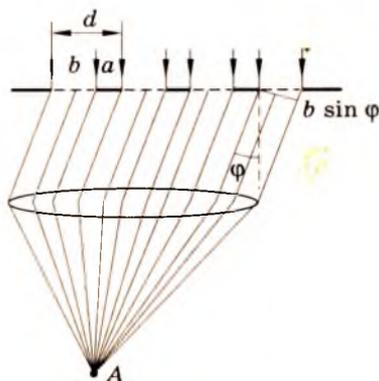


Рис. 5.40

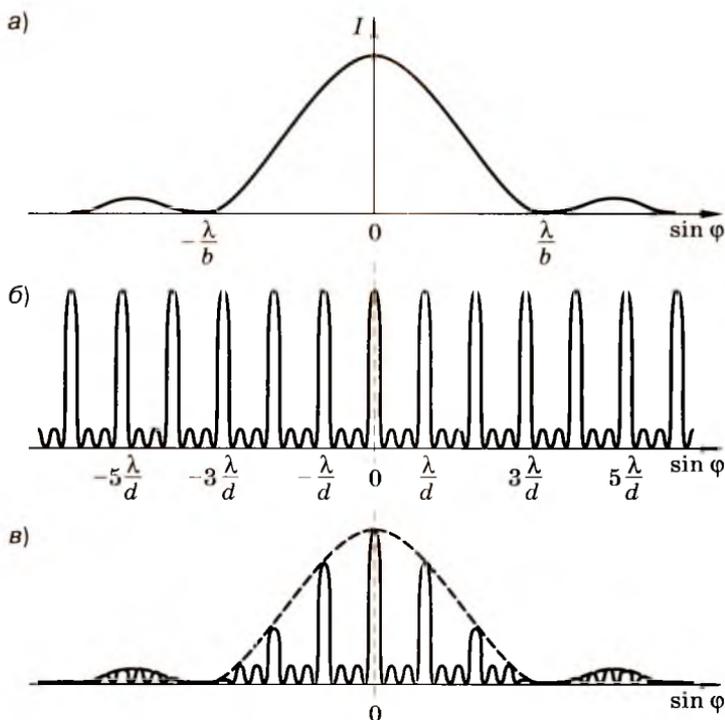


Рис. 5.41

На рис. 5.41, *a* представлено распределение интенсивности света при дифракции на единичной щели шириной  $b$ . Такое распределение будет иметь место при прохождении света через любую из щелей в отдельности. Однако наличие нескольких одинаковых по ширине щелей существенно меняет эту картину. Отвлечемся пока от дифракции на единичной щели и рассмотрим интерференцию света при прохождении через несколько щелей одновременно. Уже при наличии двух щелей картина будет сходна с той, что представлена на рис. 5.33, *б*: появятся узкие и интенсивные интерференционные максимумы, положение которых определяется соотношением

$$d \sin \varphi = \pm k \lambda \quad (k = 0, 1, 2, \dots). \quad (5.27)$$

Эти максимумы называются главными. Из (5.27) видно, что положение их не зависит от общего числа щелей  $N$ . Однако при  $N > 2$  между ними возникают дополнительные минимумы. Так, при наличии трех щелей между главными максимумами появятся два дополнительных минимума, при наличии четырех щелей — три и т. д. На рис. 5.41, *б* представлена картина для

четырёх щелей. Легко понять, что чем больше  $N$ , тем уже становятся главные максимумы.

В общем случае положения дополнительных минимумов определяются соотношением

$$d \sin \varphi = \pm \frac{k'}{N} \lambda \quad (k' = 1, 2, 3, \dots; k' \neq N), \quad (5.28)$$

где  $N$  — полное число щелей в дифракционной решетке.

Для получения суммарной картины распределения интенсивности света, прошедшего через дифракционную решетку, надо наложить друг на друга распределения 5.41, *a* и 5.41, *б*. Результат представлен на рис. 5.41, *в* сплошной линией. Иными словами, в дифракционной решетке интенсивность света при интерференции на многих щелях «корректируется» дифракцией света на каждой единичной щели.

Поскольку положение главных максимумов зависит от длины волны, белый свет, падающий на решетку, оказывается разложенным в спектр. Спектр, возникающий при  $k = \pm 1$ , называется спектром первого порядка, при  $k = \pm 2$  — второго порядка и т. д. При  $k = 0$  условие максимума выполняется одновременно для всех длин волн, поэтому нулевой максимум является белым. Интерференционные спектры схематически представлены на рис. 5.42. Цифры внизу показывают порядок спектра, буквы вверху — цвета: К — красный, Ф — фиолетовый. Видно, что, начиная со спектра третьего порядка, происходит их наложение друг на друга и картина усложняется.

В чем преимущество дифракционной решетки как оптического прибора по сравнению с одной щелью? Во-первых, из рис. 5.41 следует, что главные интерференционные максимумы значительно уже дифракционных максимумов, поэтому в спектре, получаемом посредством дифракционной решетки, близкие линии будут разрешаться гораздо лучше. Чем больше щелей содержит решетка, тем уже будут главные максимумы и тем лучше будет разрешающая способность решетки. Во-вторых, интерференционные максимумы в  $N^2$  раз более интенсивны.

Особый интерес представляет интерференция рентгеновских лучей. Из условия (5.27) следует, что для наблюдения интерференции на дифракционной решетке необходимо, чтобы  $d \sim \lambda$ .

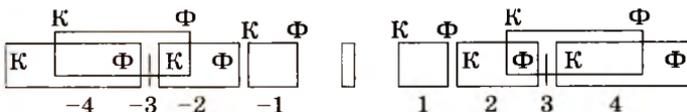


Рис. 5.42

Длина волны рентгеновских лучей в тысячи раз меньше световых и составляет  $\sim 1-10 \text{ \AA}$ , поэтому создавать решетки с таким малым периодом  $d$  исключительно сложно. Своеобразной дифракционной решеткой для рентгеновских лучей служат кристаллы, в которых атомы находятся в упорядоченном состоянии. Схематически возникновение интерференции рентгеновских лучей на кристалле представлено на рис. 5.43. В этом случае условие максимума можно записать как

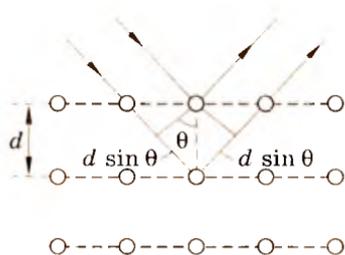


Рис. 5.43

$$d \sin \theta = \pm n\lambda \quad (n = 1, 2, 3, \dots), \quad (5.29)$$

где  $d$  — расстояние между плоскостями, вдоль которых располагаются атомы вещества. Выражение (5.29) называется формулой Вульфа—Брэгга. Оно позволяет определить взаимное расположение атомов. Дифракция рентгеновских лучей является мощным методом изучения структуры кристаллов и даже отдельных молекул. В частности, рентгено-структурный анализ позволил выяснить строение молекулы гемоглобина и обнаружить спиральную структуру ДНК. Это, в свою очередь, является большим шагом в решении проблемы существования жизни и передачи наследственности.

### 5.3.3. Поляризация света

В электромагнитной световой волне, излучаемой отдельным атомом, вектор  $\vec{E}$  (а значит и  $\vec{B}$ ) колеблется все время в одной плоскости (рис. 5.29). Такая волна называется **плоско поляризованной**. Естественный свет не является поляризованным, поскольку он образован, как было сказано выше, излучением множества атомов, которые испускают электромагнитные волны независимо друг от друга со всевозможными направлениями векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$ . При отражении света от диэлектрика, при прохождении его через анизотропную среду, при рассеянии и в некоторых других случаях обнаруживается преимущественное направление колебаний векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$ , т. е. происходит **поляризация** света. Прибор, поляризующий естественный свет, называется **поляризатором**. Примером поляризующей среды может служить кристаллическая пластин-

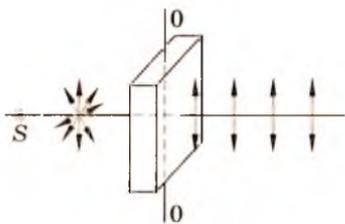


Рис. 5.44

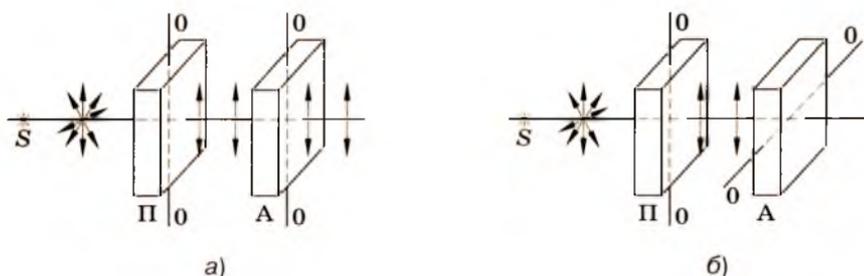


Рис. 5.45

ка турмалина, поскольку этот минерал пропускает световые волны только с одним определенным направлением колебаний вектора  $\vec{E}$  (рис. 5.44). Поместим аналогичную пластинку турмалина на пути плоскополяризованного света. В этом случае она будет называться *анализатором*. Если анализатор А располагается так же как поляризатор П (рис. 5.45, а), то поляризованный свет проходит через него беспрепятственно. Если же повернуть анализатор вокруг направления светового луча на  $90^\circ$ , то свет через него не пройдет (рис. 5.45, б). В общем случае, когда анализатор и поляризатор скрещены под углом  $\varphi$ , интенсивность прошедшего через них света определяется законом Малюса (1775—1812):

$$I = I_0 \cos^2 \varphi,$$

где  $I_0$  — интенсивность света, падающего на анализатор.

Эффект поляризации свидетельствует о том, что световые волны являются поперечными.

Поляризованный свет широко применяется для исследования анизотропных объектов, в том числе в биологии. Известно, что оптическая анизотропия имеет место у мышечных и нервных волокон. Наблюдение микроструктур в поляризованном свете (с помощью так называемого поляризационного микроскопа) позволяет выяснить их строение, что часто не удается сделать при наблюдениях в естественном свете.

## 5.4. КВАНТОВАЯ ОПТИКА

### 5.4.1. Недостатки волновой теории света

Дискуссия о природе света возникла еще во времена Ньютона, который выдвинул корпускулярную теорию света. Его современник Гюйгенс (1629—1695) был сторонником волновой теории. Электродинамика, созданная Максвеллом и опыты по интерференции, дифракции и поляризации, казалось, бесповоротно

утвердили волновую теорию света. Однако к концу XIX в. оставалось несколько явлений, которые не удавалось объяснить с этой точки зрения. Прежде всего это касалось законов теплового излучения и внешнего фотоэффекта.

Тепловым излучением называют электромагнитные волны, испускаемые нагретыми телами. Характерным свойством, отличающим тепловое излучение от других видов излучения, является его способность находиться в равновесии с излучающими телами. Поместим излучающее тело в вакуум и окружим его непроницаемой абсолютно отражающей оболочкой. Излучение, испускаемое телом, отразится от оболочки и, упав на тело, частично или полностью поглотится им. Иными словами будет происходить непрерывный обмен энергией между телом и излучением. Со временем установится равновесие, заключающееся в том, что распределение энергии между телом и излучением будет неизменным. В силу этого тепловое излучение называют также равновесным.

Тепловое излучение характеризуется *лучеиспускательной способностью*  $r$  — энергией, излучаемой телом с единицы поверхности в единицу времени. В системе СИ лучеиспускательная способность измеряется в Дж/с<sup>2</sup>·с. Отношение лучистой энергии, поглощенной телом, ко всей падающей на него энергии, называется *поглощательной способностью*  $\alpha$ . Величины  $r$  и  $\alpha$  зависят как от природы и температуры тела, так и от длины волны электромагнитного излучения. Тело, у которого поглощательная способность равна единице для любой длины волны, называют *абсолютно черным телом*. Моделью абсолютно черного тела может служить сосуд с поглощающими внутренними стенками, имеющий малое отверстие (рис. 5.46). Легко убедиться, что любой попадающий в отверстие луч при многократном отражении внутри сосуда будет полностью поглощаться.

Установлено несколько экспериментальных законов, которыми подчиняется тепловое излучение.

1. **Закон Кирхгофа:** при данной температуре отношение лучеиспускательной способности к лучепоглощательной способности для любых тел есть величина постоянная и равная лучеиспускательной способности абсолютно черного тела  $R$ , имеющего эту же температуру:

$$\frac{r_\lambda}{\alpha_\lambda} = R_\lambda \quad (5.30)$$

(индекс  $\lambda$  показывает, что параметры  $r$ ,  $\alpha$  и  $R$  берутся для определенной длины волны). Закон Кирхгофа часто используют в агрономии. Температуру почвы можно

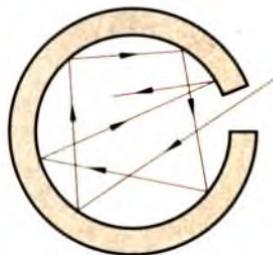


Рис. 5.46

сравнительно просто регулировать в значительных пределах, если изменять ее лучепоглощательную способность. Это достигается путем *мульчирования* — покрытия почвы тонким слоем вещества с тем или иным значением  $\alpha$ . В качестве мульчи обычно используют молотый мел, торф, угольный порошок и др.

**2. Закон Стефана—Больцмана:** полная лучеиспускательная способность абсолютно черного тела пропорциональна температуре в четвертой степени:

$$R = \sigma T^4, \quad (5.31)$$

где  $\sigma = 5,67 \cdot 10^8 \text{ Вт} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{град}^{-4}$  — постоянная Стефана—Больцмана.

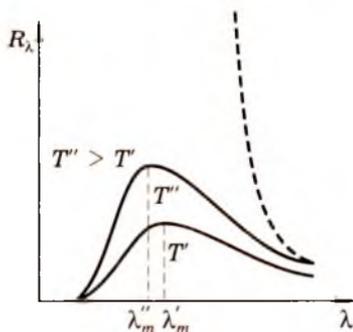


Рис. 5.47

**3. Закон Вина:** спектральное распределение лучеиспускательной способности характеризуется максимумом при некоторой длине волны (рис. 5.47), определяемой соотношением

$$\lambda_{\text{max}} T = b, \quad (5.32)$$

где  $b = 9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{град}^4$  — постоянная Вина.

Непредвиденные и непреодолимые трудности возникли перед физиками при попытке определить аналитический вид функции рас-

пределения  $R_\lambda$ . Рэлей (1842—1949) и Джинс вывели безупречную с точки зрения классической физики формулу, которая, однако, совершенно расходилась с опытом в области коротких волн. На рис. 5.47 значения  $R_\lambda$ , полученные по формуле Рэлея—Джинса, показаны штриховой линией. Сложившуюся ситуацию назвали *ультрафиолетовой катастрофой*. Это выражение уже само по себе говорило о том, насколько серьезные проблемы встали перед классической физикой.

Для объяснения спектрального распределения теплового излучения абсолютно черного тела физикам пришлось отказаться от обычных представлений о свете. М. Планк (1858—1947) предположил, что свет испускается только порциями (квантами, фотонами), энергия которых определяется частотой:

$$E = \hbar\omega = 2\pi \frac{c}{\lambda} \hbar, \quad (5.33)$$

где  $\omega$  — круговая частота,  $\hbar = 1,05 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$  — постоянная Планка\*. Исходя из этого, он в 1900 г. получил форму-

\* Вообще говоря, постоянной Планка называется величина  $h = 2\pi\hbar = 6,65 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ . Если использовать этот параметр, то формулу (5.60) можно переписать в виде  $E = h\nu$ .

лу, прекрасно соответствующую экспериментальной зависимости:

$$R_0 = \frac{\hbar c^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{2\pi ch}{\lambda kT}} - 1}. \quad (5.34)$$

Несмотря на успех гипотезы Планка, физики поверили в реальность световых квантов лишь после того, как А. Эйнштейн в 1905 г. объяснил с квантовой точки зрения законы внешнего фотоэффекта. Внешний фотоэффект был открыт Г. Герцем (1857—1894) в 1887 г. и подробно исследован в 1888—1890 гг. А. Г. Столетовым (1839—1896). Это явление заключается в испускании электронов телами, облучаемыми светом. Как и законы теплового излучения, некоторые особенности внешнего фотоэффекта не могут быть объяснены с позиций классической физики. Во-первых, фотоэффект вызывается преимущественно коротковолновым светом. Для каждого вещества имеется своя длинноволновая (красная) граница фотоэффекта. Во-вторых, увеличение интенсивности света вызывает не увеличение скорости вылетевших электронов, а увеличение их числа. Поскольку свет представляет собой электромагнитную волну, энергия которой может изменяться непрерывно, то казалось бы, что при длительном воздействии электрону можно сообщить любую энергию, необходимую для его вырывания, т. е., казалось бы, что фотоэффект должен вызываться достаточно интенсивным светом любой длины волны. Скорость вылетевших электронов в этом случае должна быть пропорциональна интенсивности света. Однако эти выводы противоречат приведенным выше экспериментальным результатам.

Для объяснения фотоэффекта Эйнштейн предположил, что свет не только излучается, но и поглощается порциями — квантами, поэтому при фотоэффекте электрон поглощает один фотон, т. е. происходит неупругое столкновение двух частиц. Для вырывания электрона из вещества необходимо совершить работу, характерную для каждого материала — *работу выхода*. Энергия поглощенного кванта света  $\hbar\omega$  тратится на совершение работы выхода  $\phi$  и сообщение электрону некоторой кинетической энергии  $W$ :

$$\hbar\omega = \phi + W. \quad (5.35)$$

Поскольку работа выхода  $\phi$  является характеристикой материала, т. е. одинакова для всех электронов\*, то при 0 К формула (5.35) справедлива лишь для электронов, вылетающих без

\* Вопрос о работе выхода подробнее обсуждается в следующей главе.

потери энергии, т. е. обладающих максимальной скоростью  $v_{\max}$ . С учетом этого перепишем (5.35) в виде

$$\hbar\omega = \varphi + \frac{mv_{\max}^2}{2}. \quad (5.36)$$

Легко убедиться, что эта формула полностью подтверждается экспериментальными законами фотоэффекта. Если энергия кванта  $\hbar\omega < \varphi$  (длинноволновое излучение), то фотоэффект не будет иметь места. Из (5.36) следует, что скорость вылетевших электронов определяется энергией кванта и не зависит от числа квантов, т. е. от интенсивности света.

Планк представлял кванты света как результат прерывистого излучения телами электромагнитных волн и не считал, что свет обладает свойствами частиц (корпускул). После работы Эйнштейна стало очевидно, что кванты света являются реальными частицами, поэтому возникла необходимость в корне пересмотреть сложившиеся к тому времени представления о свете.

#### 5.4.2. Корпускулярно-волновой дуализм и гипотеза де Бройля

Многочисленные и точнейшие опыты убедительно показали, что свет в равной степени обладает и волновыми и корпускулярными свойствами. Такой вывод, казалось, противоречит здравому смыслу, поскольку в обыденной жизни человек наблюдает только либо волновые, либо корпускулярные свойства материи. В поисках выхода из сложившейся ситуации физики первоначально предполагали, что эти трудности обусловлены ошибками теории. Однако дальнейшие эксперименты с рентгеновскими лучами показали, что они тоже обладают двойственной природой.

В 1923—1925 гг. Луи де Бройль высказал гипотезу, что двойственность свойств присуща не только свету, но и материи вообще. Любой частице, например, электрону можно сопоставить волну, длина которой определяется соотношением

$$\lambda = \frac{2\pi\hbar}{p}, \quad (5.37)$$

где  $p = mv$  — импульс частицы. Легко убедиться, что это соотношение является фундаментальным. Например, из него автоматически вытекает связь между энергией светового кванта и частотой световой волны. Если скорость распространения света —  $c$ , то  $p = mc$ . Масса кванта света  $m = \frac{E}{c^2}$ , поэтому  $\lambda = \frac{2\pi\hbar c^2}{Ec} = 2\pi \frac{\hbar c}{E}$ ,  $E = 2\pi\hbar \frac{c}{\lambda} = \hbar\omega$ .

Гипотеза де Бройля была блестяще подтверждена в 1927—1928 гг. опытами Дэвиссона, Джермера и Томсона по рассеянию электронов на кристаллах. Оказалось, что электроны, которые заведомо считались частицами, проходя через тонкие кристаллические пленки, создают такую же дифракционную картину, как и электромагнитные волны рентгеновского диапазона.

Все это позволило датскому физiku Нильсу Бору (1885—1965) выдвинуть *принцип дополнительности*, согласно которому в мире не существует «чистых» частиц и «чистых» волн. Все материальные объекты имеют двойственную природу — обладают *корпускулярно-волновым дуализмом*. В зависимости от характера проводимого эксперимента проявляются либо корпускулярный, либо волновой аспект наблюдаемого объекта. Например, при встрече с электроном свет взаимодействует с ним как частица и обладает при этом всеми признаками частицы (массой, импульсом, дискретной энергией), а проходя через малые отверстия, ведет себя как волна. Пучок электронов, проходящий через две щели (рис. 5.48, а), интерферирует так же, как и световые волны (рис. 5.48, б). Схематически один из возможных опытов по интерференции электронов представлен на рис. 5.49. Здесь распределения электронов показаны для следующих ситуаций: а — открыта щель А; б — открыта щель В; в — ожидаемое распределение при открытии обеих щелей; г — экспериментальное распределение при открытии обеих щелей.

Более того: интерференция электрона наблюдается и в том случае, когда он проходит через щели в одиночку! С одной стороны это означает, что электрон проходит одновременно через обе щели, но с другой стороны — зарегистрировать половину или любую другую часть электрона никогда не удастся: он взаимодействует с детектором (например, с фотопластинкой) всегда как неделимая частица. В этом проявляется еще одна особенность рассматриваемых явлений. В классической физике предполагается, что

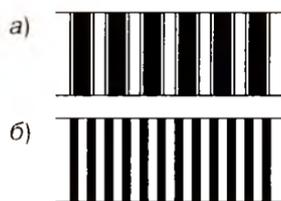


Рис. 5.48

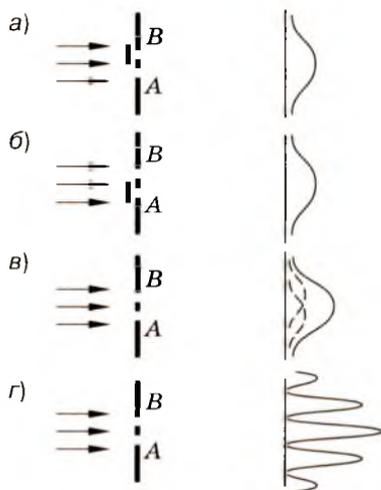


Рис. 5.49

физические процессы не зависят от условий их наблюдения. Опыты с электронами и фотонами убедили, что пренебрегать взаимодействием этих объектов с инструментами и приборами нельзя. По этой причине в различных экспериментах проявляется тот или иной аспект корпускулярно-волнового дуализма.

Каков же физический смысл электронных волн? В настоящее время принято считать, что интенсивность «электронной волны» в какой-либо точке пространства пропорциональна вероятности нахождения частицы в этой точке. Иными словами, электронные волны — это волны вероятности. Амплитуда такой волны обозначается буквой  $\psi$  (пси). В общем случае  $\psi$  является функцией координат и времени:  $\psi(x, t)$ . Интенсивность волны определяется квадратом амплитуды, поэтому вероятность нахождения частицы в точке  $x$  пропорциональна величине  $|\psi(x, t)|^2$ . Таким образом, непосредственный физический смысл имеет квадрат абсолютного значения амплитуды  $\psi$ -функции, а не сама  $\psi$ -функция.

В заключение следует подчеркнуть, что корпускулярно-волновому дуализму нет механической аналогии, и он не может быть представлен наглядно. Как уже было сказано выше, реальные свойства материального мира гораздо многообразнее и сложнее, чем те, которые человек воспринимает зрительно, о которых узнает из повседневного опыта.

## 5.5. ЭЛЕМЕНТЫ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ

Открытие корпускулярно-волнового дуализма микробъектов привело к возникновению нового раздела физики — *квантовой механики*. Квантовая механика не противоречит классической физике. Она является более общей и переходит в классическую физику в том случае, когда длина волны  $\lambda$ , соответствующая частице, становится бесконечно малой. Так как  $\lambda$  обратно пропорциональна массе  $m$ , что следует из (5.37), то для тел достаточно большой массы (практически — уже для больших молекул)  $\lambda = 0$  и законы классической механики вполне справедливы.

### 5.5.1. Уравнение Шредингера

Движение макрообъектов подчиняется второму закону Ньютона. Роль второго закона Ньютона в квантовой механике играет уравнение Шредингера (1887—1961) для  $\psi$ -функции. Если потенциальная энергия  $U$  не зависит от времени, то уравнение Шредингера можно записать в виде

$$\frac{d\psi}{dt^2} + \frac{2m}{\hbar^2} (E - U)\psi = 0, \quad (5.38)$$

где  $E$  — полная энергия частицы, равная сумме кинетической и потенциальной энергии. Рассмотрим одномерную бесконечно глубокую потенциальную яму (рис. 5.50). Можно убедиться подстановкой, что для данных условий решение (5.38) будет иметь вид

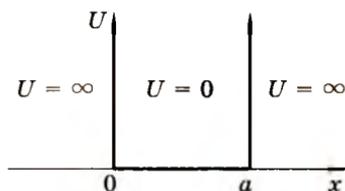


Рис. 5.50

$$\psi(x) = A \sin \left( \sqrt{\frac{2m}{\hbar^2}} E x + \alpha \right), \quad (5.39)$$

где  $\alpha$  — начальная фаза. Существование частицы, например, электрона, в области  $U = \infty$  физически невозможно, поэтому  $\psi$ -функция должна обращаться в нуль при  $x = 0$  и  $x = a$ , т. е.

$$\psi(0) = A \sin \alpha = 0,$$

$$\psi(a) = A \sin \left( \sqrt{\frac{2m}{\hbar^2}} E a + \alpha \right) = 0.$$

Из этих уравнений следует, что  $\alpha = 0$ , а  $\sqrt{\frac{2m}{\hbar^2}} E a = \pm \pi n$ , где  $n = 1, 2, 3, \dots$  называется **квантовым числом**. Следовательно, энергия электрона принимает дискретные значения

$$E = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2ma^2} n^2. \quad (5.40)$$

Дискретные уровни энергии и соответствующие им  $\psi$ -функции представлены на рис. 5.51, а и б. Вероятности нахождения электронов в том или ином месте потенциальной ямы представлены на рис. 5.51, в. Видно, что при  $n = 1$  частица находится преимущественно в центре ямы, а при  $n = 2$  ее с равной вероятностью можно обнаружить как в левой, так и в правой части. Очевидно, что с классической точки зрения частица могла бы иметь любую энергию и находиться в любом месте потенциальной ямы.

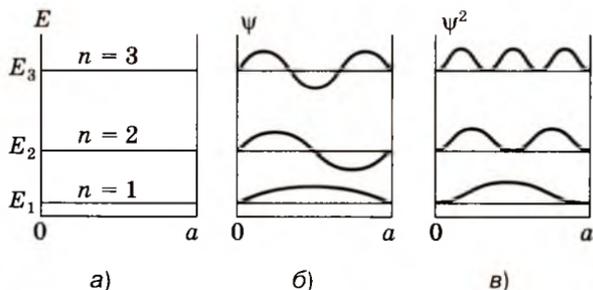


Рис. 5.51

## 5.5.2. Туннельный эффект

Туннельным эффектом называется «просачивание» микро-частицы сквозь потенциальный барьер. Это квантово-механическое явление не имеет аналогии в классической механике. Поясим его на следующем примере. Шарик с массой  $m$ , находящийся в цилиндрическом стакане высотой  $h$  (рис. 5.52), может оказаться снаружи лишь в том случае, если получит энергию  $E = mgh$ . В отличие от этого, электрон, помещенный в потенциальную яму, стенки которой имеют конечную высоту и толщину, может оказаться через некоторое время за пределами потенциальной ямы даже обладая нулевой энергией. Туннельный эффект объясняется тем, что в рассмотренном случае  $\psi$ -функция отлична от нуля как в области потенциального барьера, так и за его пределами, поэтому всегда будет существовать определенная вероятность обнаружить электрон вне потенциальной ямы. Схематически это явление представлено на рис. 5.53. Вероятность туннельного эффекта возрастает при уменьшении высоты и ширины потенциального барьера.  $\psi$ -функция частицы в потенциальной яме с более тонкими стенками изображена на рис. 5.53 штриховой линией.

Туннельный эффект имеет место при автоэлектронной эмиссии, при радиоактивном  $\alpha$ -распаде и в некоторых других случаях.

## 5.5.3. Соотношение неопределенностей Гейзенберга

Квантовая механика отвергает сложившееся в классической физике представление о том, что все физические параметры данного объекта могут быть в принципе измерены одновременно с любой точностью. Например, с классической точки зрения в любой момент времени можно точно определить координату  $x$  и импульс  $p$  какого-либо тела.

В. Гейзенберг (р. 1901), один из создателей квантовой механики, показал, что при измерении координаты частицы с точно-

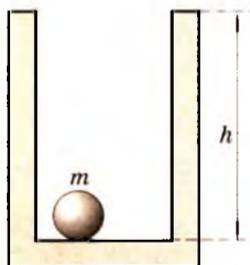


Рис. 5.52

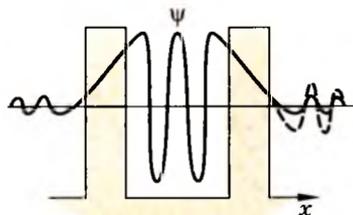


Рис. 5.53

стью  $\Delta x$  нельзя одновременно определить ее импульс с точностью, большей, чем  $\Delta p_x = \frac{2\pi\hbar}{\Delta x}$ . Или, что то же,

$$\Delta x \Delta p_x \geq 2\pi\hbar. \quad (5.41)$$

Это положение называется *принципом неопределенности Гейзенберга*. Поясним принцип неопределенности следующим образом. Допустим, что *известно точное значение импульса частицы  $p$* . Такой частице соответствует монохроматическая волна, т. е. волна строго определенной длины  $\lambda = \frac{2\pi\hbar}{p}$ . Выше отмечалось, что монохроматическая волна не ограничена в пространстве и времени, т. е. интенсивность такой волны одинакова во всем пространстве. Следовательно, такую частицу можно с равной вероятностью обнаружить в любой точке — *ее координата оказывается абсолютно неопределенной*. С другой стороны, если частица локализована в некоторой области пространства (координата ее известна с определенной точностью), то ей следует сопоставить набор большого числа монохроматических волн (см. раздел 5.2), которые, накладываясь друг на друга, создают локализованный волновой пакет. Поскольку волновой пакет не может быть охарактеризован одной длиной волны, импульс частицы в этом случае будет неопределенным.

Соотношение неопределенностей Гейзенберга является следствием влияния условий эксперимента на состояние микрочастиц, о котором уже было сказано выше.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И УПРАЖНЕНИЯ

1. Почему процессы в виде синусоидальной волны широко распространены в природе?

2. Из материала этой главы понятно, что «видеть» предмет в результате отражения направленных на него волн можно лишь тогда, когда размер предмета существенно больше, чем длина волны (иначе возникает явление дифракции). Каковы размеры предметов, которые могут обнаружить летучие мыши с помощью своего сонора с частотой звука 100000 Гц? Известно, что дельфины тоже используют аналогичную частоту (правда, в воде, а не в воздухе). Каков минимальный размер предметов, которые могут обнаружить дельфины с помощью своего сонора? Значимы ли для этих животных размеры предметов, которые они могут определить? Примите скорость звука в воздухе  $v = 343$  м/с, а в воде  $v = 1500$  м/с.

3. Какову форму имеет волновой фронт, исходящий от точечного источника в двумерной среде (например, на поверхности воды) и в трехмерной среде (например, в открытом воздухе)?

4. Будет ли оркестр, в котором есть инструменты, издающие высокие и низкие звуки, на большом расстоянии звучать беспрядочно? Иными словами, зависит ли скорость распространения звука в воздухе от его частоты?

5. Почему для лучшей передачи голоса на расстояние используют рупор, или складывают ладони рупором?

6. Какое влияние на условия получения стоячей волны (например, в гитарной струне) имеет натяжение струны?

7. Корпус гитары способствует усилению ее звучания. Откуда же берется на это дополнительная энергия?

8. Почему все четыре струны скрипки имеют одинаковую длину, но каждая из них производит свою, отличную от других основную ноту?

9. Допустим, что в некоторой области интерференционной картины от двух щелей возникает усиление для красного света. Какова будет ситуация для синего и других цветов, если щели освещаются белым светом?

10. Как объяснить, что прозрачные объективы современных оптических приборов (фотоаппаратов, видеокамер и т. п.) кажутся черными, хотя их при этом называют просветленными?

11. Будет ли проволочная сетка хорошим отражателем для звуковых волн, а бетонная стенка — для радиоволн?

12. Верно ли, что импульсы, передаваемые световой волной освещенному телу, равны поглощаемой телом энергии, деленной на скорость света? Решите этот вопрос с точки зрения размерности физических величин.

13. Почему способность данного тела служить препятствием для волн зависит от длины волны?

14. Уравнение движения теннисного мяча дает точное значение его положения как функцию времени. Похоже, что квантовая теория не дает такой информации о движении микрочастиц (электронов, протонов и т. п.)?

15. Написать уравнение гармонического колебательного процесса с амплитудой 0,1 м, периодом 5 с и начальной фазой  $\frac{\pi}{4}$ . Начертить график этого движения.

16. Определить частоту, с которой будет совершать колебания паук, висящий на паутине длиной 10 см.

17. Какую собственную частоту имеет колебательный контур, состоящий из катушки с индуктивностью  $2 \cdot 10^{-3}$  Гн и конденсатора емкостью  $2 \cdot 10^{-6}$  Ф?

18. Катушка с активным сопротивлением 20 Ом и индуктивностью  $5 \cdot 10^{-3}$  Гн последовательно включена в цепь переменного тока частотой 50 Гц. Определить полное и реактивное сопротивление цепи.

19. Человеческое ухо способно воспринимать звуковые колебания в диапазоне 20—18000 Гц. Определить длины волн, соответствующие граничным колебаниям. Скорость распространения звука в воздухе принять равной 340 м/с.

20. Свет, длина волны которого равна 5000 Å, падает перпендикулярно щели. При какой ширине щели под углом 30° будет наблюдаться дифракционный максимум пятого порядка?

21. Определить длину световой волны, которая проходит через дифракционную решетку с  $d = 10^{-2}$  мм, если известно, что под углом 10° наблюдается максимум третьего порядка?

22. Какое количество энергии излучает Солнце за одну секунду? Считать, что оно является абсолютно черным телом. Температура поверхности Солнца приблизительно равна 6000 К. Какую массу теряет Солнце каждую секунду?

23. Определить длину волны, на которую приходится максимум спектрального распределения энергетической светимости абсолютно черного тела, имеющего температуру, равную температуре человеческого тела (37 °С).

24. Выразить полную энергию фотона через длину волны.

25. Работа выхода электронов для калия составляет 2,0 эВ. Определить красную границу фотоэффекта. Какую максимальную энергию будут иметь электроны, вылетевшие из калия, если облучать его фиолетовым светом ( $\lambda = 4000$  Å)?

26. Пороговая чувствительность сетчатки человеческого глаза к желтому свету ( $\lambda = 6000$  Å) составляет  $1,7 \cdot 10^{-18}$  Вт. Сколько фотонов при этом каждую секунду попадает на сетчатку?

27. Каким импульсом обладает электрон с энергией 1000 эВ?

28. Какова длина волны пули массой 5 г, летящей со скоростью 600 м/с?

29. Какой длиной волны обладает протон, движущийся со скоростью 20000 км/с?

30. В экспериментах с электронными пучками установили, что электроны проходят через щель шириной 10 Å. С какой точностью можно определить импульс электронов в этот момент?

# СТРОЕНИЕ ВЕЩЕСТВА

## 6.1. СТРОЕНИЕ АТОМА

### 6.1.1. Строение атома водорода и постулаты Бора

Опыты, проведенные Э. Резерфордом (1871—1937) в 1910—1913 гг., показали, что атом имеет «ядерное» строение. Основная масса атома сосредоточена в малом по размеру ядре\*, которое окружено электронами. Построение ядерной модели столкнулось с огромными трудностями. Статическая система, состоящая из положительного ядра и окружающих его неподвижных отрицательных электронов, явно неустойчива, так как за счет взаимного притяжения зарядов электроны должны упасть на ядро. Более удовлетворительной была планетарная модель, согласно которой электроны под действием кулоновских сил притяжения вращаются вокруг ядра, подобно тому, как вращаются по своим орбитам планеты. Однако с классической точки зрения и такая система не может существовать продолжительное время. Из электродинамики следует, что любой ускоренно движущийся электрический заряд (а электрон в планетарной модели имеет центростремительное ускорение) должен излучать электромагнитные волны, которые уносят часть его энергии. Поэтому электрон должен был бы двигаться по сходящейся спирали и уже через  $\sim 10^{-6}$  с упасть на ядро. Итак, *строение атома не может быть объяснено в рамках классической физики*. Решить эту проблему позволила лишь квантовая механика.

Рассмотрим простейший из атомов — атом водорода. Потенциальная энергия электрона в поле ядра может быть представлена выражением\*\*

$$U = -\frac{e^2}{r}, \quad (6.1)$$

где  $e$  — заряд электрона,  $r$  — расстояние электрона от ядра. Видно, что с энергетической точки зрения электрон находится в по-

\* Размеры ядер составляют величину порядка  $10^{-13}$  см, т. е. в десятки тысяч раз меньше размеров атомов.

\*\*В данном разделе используется гауссова система единиц.

тенциальной яме, которая схематически представлена на рис. 6.1. Уравнение Шредингера в этом случае следует записать так:

$$\frac{d^2\psi}{dt^2} + \frac{2m}{\hbar^2} \left( E + \frac{e^2}{r} \right) \psi = 0. \quad (6.2)$$

Решение уравнения (6.2), как и уравнения (5.38) в предыдущем разделе, приводит к выводу, что энергия электрона в атоме водорода дискретна:

$$E_n = \frac{me^2}{2\hbar^2} \frac{1}{n^2}, \quad (6.3)$$

где параметр  $n = 1, 2, 3$  и т. д. получил название *главного квантового числа*.

Некоторые из энергетических уровней электрона в атоме водорода представлены на рис. 6.1 горизонтальными линиями. Вероятность нахождения электрона на том или ином расстоянии от ядра (и соответственно на том или ином уровне) определяется квадратом модуля  $\psi$ -функции (рис. 6.2). Видно, что электрон «размазан» в пространстве вокруг ядра, причем для каждого значения энергии (для каждого значения  $n$ ) есть определенное расстояние, на котором плотность «электронного облака» максимальна. С увеличением энергии электрона максимум «электронного облака» удаляется от ядра на расстояние, прямо пропорциональное квадрату главного квантового числа  $n$ . Не следует думать, что электрон в атоме и в самом деле имеет форму некоторого облака. Под «облаком» здесь понимается лишь распределение вероятности нахождения электрона в той или иной точке пространства. В силу принципа неопределенности

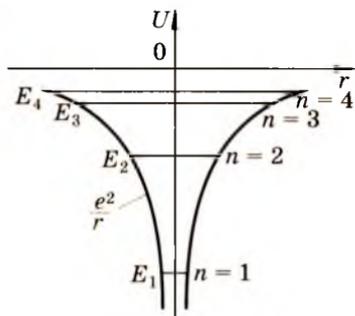


Рис. 6.1

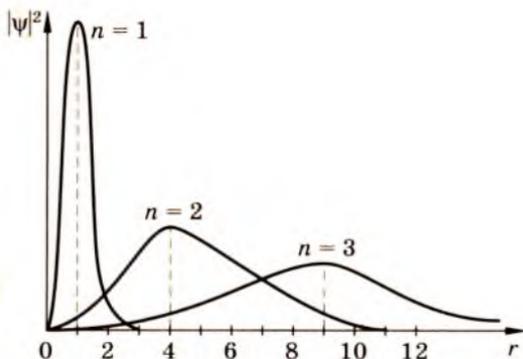


Рис. 6.2

Гейзенберга вообще не имеет смысла говорить о точном местоположении электрона в атоме.

Как следует из вышесказанного, строение атома в квантово-механической интерпретации не является наглядным.

Исторически квантовой механике предшествовала «полуклассическая» теория строения атома водорода, которую предложил в 1913 г. Н. Бор. Теория Бора сыграла определяющую роль в развитии квантовой механики. Бор сформулировал три постулата:

1. Электрон может двигаться вокруг ядра только по определенным стационарным орбитам с радиусом  $r_n$ , на которых он обладает моментом импульса, кратным постоянной Планка  $\hbar$ :

$$mvr_n = n\hbar. \quad (6.4)$$

2. Электрон, движущийся по стационарной орбите, не излучает электромагнитных волн, поэтому его энергия остается постоянной.

3. Электрон излучает квант света

$$\hbar\omega = E_{n_2} - E_{n_1} \quad (6.5)$$

при переходе с более высокой стационарной орбиты на более низкую.

Для электрона, находящегося на стационарной орбите, выполняется условие:

$$\frac{e^2}{r^2} = \frac{mv^2}{r}. \quad (6.6)$$

Легко видеть, что это второй закон Ньютона для движения материальной точки по окружности (см. разделы 2.1.2 и 2.2.2), где сила притяжения между электроном и ядром выражается в гауссовой системе единиц.

При совместном решении уравнений (6.4) и (6.6) находим

$$v = \frac{e^2}{n\hbar}, \quad (6.7)$$

$$r_n = \frac{\hbar^2}{me^2} n^2. \quad (6.8)$$

Видно, что радиусы стационарных орбит возрастают прямо пропорционально квадрату квантового числа  $n$ .

Кинетическая энергия электрона на орбите  $W = \frac{mv^2}{2} = \frac{e^2}{2r}$ , потенциальная  $U = -\frac{e^2}{r}$ . Полная энергия электрона  $E = W + U = \frac{e^2}{2r} - \frac{e^2}{r} = -\frac{e^2}{2r}$ . С учетом значения  $r$  из (6.8)

$$E = -\frac{me^4}{2\hbar^2} \frac{1}{n^2}. \quad (6.9)$$

Это выражение совпадает с (6.3), которое получается при строгом квантовомеханическом рассмотрении электрона в атоме водорода. Радиус боровской орбиты следует сопоставить расстоянию, на котором вероятность нахождения электрона максимальна (рис. 6.2).

Условие квантования электронных орбит (6.4) с волновой точки зрения означает, что возможны лишь те орбиты, на которых укладывается целое число волн де Бройля. Действительно, умножим обе части (6.4) на  $2\pi$  и преобразуем:

$$2\pi r m v = n \hbar 2\pi; \quad 2\pi r = \frac{2\pi \hbar}{m v} n; \quad 2\pi r = \lambda n.$$

Итак, выводы теории Бора, несмотря на ее половинчатость, согласуются с выводами квантовой механики.

### 6.1.2. Электронные переходы в атомах

Еще в XIX в. было экспериментально установлено, что спектр излучения атомов водорода состоит из серий, одна из которых представлена на рис. 6.3. Частоты спектральных линий определяются формулой Бальмера (1825—1898):

$$\omega = R \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right), \quad (6.10)$$

где  $R = 2,07 \cdot 10^{16} \text{ с}^{-1}$  — постоянная Ридберга,  $n = 1, 2, 3, \dots$ ,  $k = 2, 3, 4, \dots, (n + 1)$ . Значение  $n$  определяет порядковый номер серии, а  $k$  — порядковый номер линии в данной серии. Замечательным достижением теории Бора было объяснение этих спектральных закономерностей.

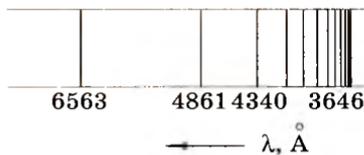


Рис. 6.3

На рис. 6.4 в соответствии с формулой (6.9) представлены разрешенные значения энергии электрона в атоме водорода. В нормальном состоянии электрон обладает минимальной энергией  $E_1$ . Если электрон получит некоторую порцию энергии, например, при столкновении атома с атомом, при поглощении кванта света, то он возбудится — перейдет на более высокий энергетический уровень.

Переход возбужденного электрона с высокого уровня на более низкий сопровождается (по третьему постулату Бора) излучением светового кванта. На рис. 6.4 возможные переходы такого рода представлены стрелками. Легко видеть, что спектр излучения действительно состоит из серий. Численные значения частоты спектральных линий можно найти при совместном решении уравнений (6.5) и (6.9):

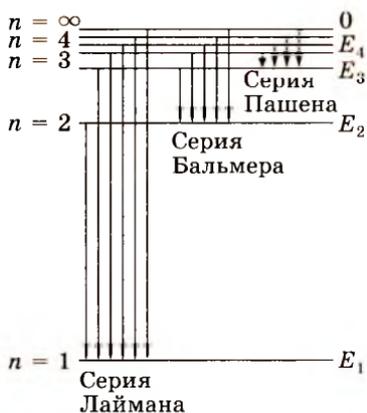


Рис. 6.4

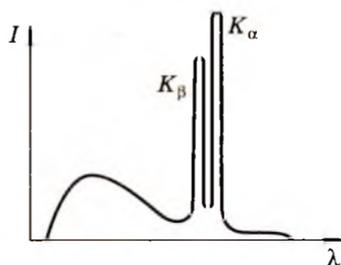


Рис. 6.5

$$\omega = \frac{me^4}{2h^3} \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right). \quad (6.11)$$

Эта формула практически совпадает с экспериментальной зависимостью (6.10).

Энергия изучаемого кванта будет тем выше, чем больше расстояние между соответствующими энергетическими уровнями. В спектре излучения водорода первая серия ( $n = 1$ ) — серия Лаймана — лежит в ультрафиолетовой области. Вторая серия ( $n = 2$ ) — серия Бальмера — лежит в видимой области, а все последующие серии (Пашена, Брэкета, Пфунда и т. д.) лежат в инфракрасной области спектра. Оптические спектры других (многоэлектронных) атомов обусловлены переходом из возбужденного состояния в менее возбужденное состояние слабо связанных внешних (валентных) электронов. Если же каким-либо образом удалить сильно связанный с ядром внутренний электрон, то при переходе на его место других электронов будут излучаться кванты очень больших энергий. Их частота лежит уже в рентгеновской области спектра. Возникающий при этих переходах рентгеновский спектр будет зависеть от структуры электронных оболочек атома, поэтому он называется *характеристическим*. Из сказанного выше ясно, что характеристическое рентгеновское излучение монохроматично. Рентгеновское излучение возникает и при сильном торможении быстро летящих электронов. Такое излучение называется *тормозным* и обладает сплошным спектром. В общем случае при облучении твердого тела электронами большой энергии будет возникать как тормозное, так и характеристическое излучение. Такой спектр имеет вид, представленный на рис. 6.5.

### 6.1.3. Лазеры

В возбужденном состоянии электроны, как правило, не могут находиться долго — они самопроизвольно переходят в основное состояние. Возникающее при этом излучение называется самопроизвольным или *спонтанным* (рис. 6.6). Поскольку электроны в различных атомах совершают переходы независимо друг от друга, спонтанное излучение не будет когерентным, и по той же причине не будет иметь преимущественного направления поляризации. Такое излучение дают практически все естественные источники света (Солнце, лампы накаливания, газоразрядные лампы и т. д.).

Электрон может перейти с возбужденного уровня  $E_2$  на уровень  $E_1$  не только спонтанно, но и под действием кванта света, если энергия этого кванта совпадает с  $\Delta E = E_2 - E_1$ . Такой переход, как и возникающее при этом излучение, называется вынужденным или *индуцированным*. Схематически этот процесс представлен на рис. 6.7. Возникновение индуцированного излучения можно объяснить тем, что проходящая электромагнитная волна как бы «раскачивает» электрон, находящийся на высоком энергетическом уровне, и тем самым облегчает его переход на более низкий уровень. Индуцированный фотон совершенно неотличим от первичного. Индуцированная электромагнитная волна распространяется в том же направлении, имеет ту же частоту и фазу, ту же плоскость поляризации. Следовательно, индуцированное излучение является когерентным.

Индуцированное излучение получают в оптических квантовых генераторах — *лазерах*, которые были созданы независимо в СССР Н. Г. Басовым и А. М. Прохоровым и в США Ч. Таунсом. За это они получили Нобелевскую премию. Электронные переходы в лазерах несколько сложнее рассмотренных выше. Диаграмма энергетических уровней типичного лазера представлена на рис. 6.8. Уровни  $E_2$  и  $E'_1$  отличаются друг от друга тем, что на втором из них электрон находится в метастабильном состоянии, т. е. время его жизни на уровне  $E'_1$  значительно больше, чем на  $E_2$ . Если непрерывно возбуждать электроны из основного состояния

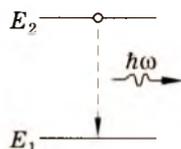


Рис. 6.6

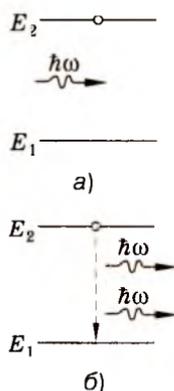


Рис. 6.7

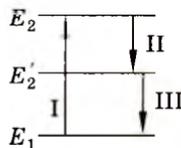


Рис. 6.8

$E_1$  в состояние  $E_2$  (этот переход обозначен на рис. 6.8 цифрой I), то они будут спонтанно переходить на уровень  $E'_1$  (II) и накапливаться на нем. Может оказаться так, что концентрация электронов на этом уровне будет выше, чем на уровне  $E_1$ . Такое распределение электронов по энергетическим уровням называют *инверсной заселенностью*. Достаточно одного спонтанного перехода электрона с уровня  $E'_1$  на уровень  $E_1$ , чтобы вызвать быстрый индуцированный переход всех других электронов, который сопровождается мощной вспышкой когерентного лазерного излучения. В настоящее время лазерный эффект получен в газах, жидкостях и твердых телах.

Лазеры уже сейчас находят широкое и важное применение в радиосвязи, в радиолокации, для обработки твердых материалов, в биологии, в медицине и т. д. Например, лазерный луч используют для удаления опухолей, для операций на глазе и т. п.

## 6.2. ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЭЛЕМЕНТОВ

При строгом квантово-механическом рассмотрении электрона, находящегося в атоме, оказалось, что его состояние определяется не одним квантовым числом  $n$ , а четырьмя квантовыми числами, которые имеют следующий смысл:

$n = 1, 2, 3, \dots$  — *главное квантовое число* определяет энергию электрона в атоме;

$l = 0, 1, 2, 3, \dots, (n - 1)$  — *орбитальное квантовое число* характеризует момент импульса электрона на орбите;

$m = 1, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots, \pm l$  — *магнитное квантовое число* характеризует ориентацию вектора момента импульса электрона на орбите в магнитном поле;

$s = \pm 1/2$  — *спиновое квантовое число* характеризует собственный момент импульса электрона.

Совокупность электронов в атоме, характеризующихся одним значением  $n$ , называется *слоем*. Слои обозначаются заглавными латинскими буквами, как это показано в таблице. Совокупность электронов с одинаковыми в пределах данного слоя значениями  $l$ , называется *оболочкой*. В *K*-слое содержится только одна оболочка, так как при  $n = 1$   $l$  может быть равно только 0. В *L*-слое содержатся две оболочки, поскольку при  $n = 2$ ,  $l = 0$  и 1. В *M*-слое — три оболочки и т. д.

$n$	1	2	3	4	5	6	7	и т. д.
Слой	<i>K</i>	<i>L</i>	<i>M</i>	<i>N</i>	<i>O</i>	<i>P</i>	<i>Q</i>	

Состояние электронов в атоме, или электронную конфигурацию атома, принято обозначать следующим образом. Значение главного квантового числа  $n$  определяется цифрой; рядом с ней стоит строчная буква латинского алфавита, обозначающая оболочку (значениям  $l = 0, 1, 2, 3$  и т. д. соответствуют буквы  $s, p, d, f$  и т. д.); число электронов в оболочке обозначают верхним цифровым индексом. Например, запись  $1s^2$  означает, что в  $s$ -оболочке ( $l = 0$ )  $K$ -слоя ( $n = 1$ ) находятся два электрона.

В. Паули (1900—1958), анализируя закономерности в спектрах излучения атомов, открыл следующий закон. ***В любой квантовой системе, например в атоме, не может быть двух или более электронов в одном состоянии, т. е. обладающих одинаковым набором квантовых чисел  $n, l, m$  и  $s$ .*** Этот закон называется ***принципом Паули***. Принцип Паули позволяет объяснить химические свойства атомов и структуру Периодической системы элементов Д. И. Менделеева (1834—1907).

Рассмотрим атом водорода, стоящий в таблице Менделеева под номером 1. Единственный его электрон в основном состоянии характеризуется следующим набором квантовых чисел:  $n = 1, l = 0, m = 0$ . Спин электрона при этом может быть равен  $+1/2$  или  $-1/2$ . Электронную конфигурацию атома водорода можно записать как  $1s^1$ . При увеличении заряда ядра на единицу и добавлении еще одного электрона получается атом гелия, электронная конфигурация которого —  $1s^2$ . Оба электрона находятся в  $K$ -слое и обладают антипараллельными спинами ( $s = \pm 1/2$ ). Очевидно, что в  $K$ -слое не может быть больше электронов, так как все возможные состояния уже исчерпаны. Атом лития, третьего элемента в таблице Менделеева, содержит три электрона. Третий электрон уже находится в  $L$ -слое и электронная конфигурация лития —  $1s^2 2s^1$ . Всего в  $L$ -слое могут находиться 8 электронов. Два из них находятся в  $s$ -оболочке ( $n = 2, l = 0, m = 0, S = \pm 1/2$ ), а 6 — в  $p$ -оболочке ( $n = 2, l = 1, m = 0, S = \pm 1/2$ ;  $n = 2, l = 1, m = +1, s = \pm 1/2$ ;  $n = 2, l = 1, m = -1, s = \pm 1/2$ ). Заполнение  $L$ -слоя заканчивается у неона, который является, как и гелий, инертным газом. Подобным образом заполняются и последующие оболочки. Однако наблюдаются и некоторые отступления. Например, у калия вместо состояния  $3d$  заполняется  $4s$ . Дело в том, что энергия электрона в состоянии  $4s$  оказывается меньше, чем в состоянии  $3d$ . Такова же причина и других отступлений. Следовательно, заполнение электронных состояний в атомах, помимо принципа Паули, определяется также энергетическим принципом. Электроны должны заполнять разрешенные состояния с минимальной энергией. Заполнение электрон-

ных слоев в элементах первых трех периодов схематически представлено в таблице на стр. 216.

Химические свойства элементов определяются количеством электронов во внешнем слое. Именно внешние электроны определяют валентность атома, поэтому их часто называют валентными. Например, одновалентные щелочные металлы (Li, K, Na и др.) имеют по одному внешнему электрону, который легко вступает во взаимодействие с электронными оболочками других элементов. У инертных газов внешний слой полностью заполнен, поэтому электронная конфигурация атома очень устойчива, и такие элементы не вступают в химические реакции. Если для получения заполненного электронного слоя атому легче отдать электроны (элементы I, II и III групп), то валентность элементов считается положительной. Если же устойчивая электронная конфигурация легче получается при добавлении электронов (элементы V, VI и VII групп), — валентность отрицательна.

Объяснение химических свойств атомов и построение периодической системы элементов является огромной заслугой квантовой механики.

## 6.3. СТРОЕНИЕ МОЛЕКУЛ

Нейтральные атомы на далеком расстоянии очень слабо взаимодействуют друг с другом. При тесном сближении атомов между ними возникают значительные силы взаимодействия, которые приводят к образованию молекулы. Несмотря на то что эти силы имеют электрическое происхождение, образование молекул не может быть полностью объяснено в рамках классической физики.

Рассмотрим различные механизмы образования межатомных (химических) связей.

### 6.3.1. Ионная связь

Как было сказано выше, одни из элементов, например щелочные металлы, легко отдают электроны, превращаясь в положительные ионы, другие же, например галогены, легко превращаются в отрицательные ионы, приобретая дополнительные электроны. Химическая связь, характеризующаяся тем, что электроны от одного атома полностью переходят к другому, называется *ионной*. Понятно, что ионная связь осуществляется за счет взаимного притяжения разноименно заряженных ионов. Типичными представителями ионных соединений являются щелочно-галогенидные молекулы ( $\text{Li}^+\text{F}^-$ ,  $\text{Na}^+\text{Cl}^-$ ,  $\text{K}^+\text{Br}^-$  и др.).

Энергия, которую необходимо затратить для диссоциации молекулы, называется энергией связи. В среднем энергия связи ионных молекул составляет несколько электронвольт.

### 6.3.2. Ковалентная связь

Ковалентная связь возникает между одинаковыми атомами, например, при образовании молекулы водорода ( $H_2$ ), кислорода ( $O_2$ ) и др. В этом случае атомы совершенно равноправны, и нельзя полагать, что один из них заряжен положительно, а другой — отрицательно. Химическая ковалентная связь осуществляется за счет «обобществления» двух электронов. Это явление носит квантово-механический характер и наблюдается при частичном перекрытии электронных оболочек атомов, т. е. частичном перекрытии волновых  $\psi$ -функций. Силы притяжения, возникающие при этом, часто называются силами обменного взаимодействия. Образование ковалентной связи в молекуле водорода схематически представлено на рис. 6.9.

Атомы, составляющие ковалентную молекулу, находятся на некотором оптимальном расстоянии друг от друга. В равновесии силы электростатического отталкивания уравновешены силами обменного взаимодействия. Если же попытаться сблизить атомы больше, то электронные оболочки атомов будут значительно деформироваться, что приводит к возникновению мощных сил отталкивания.

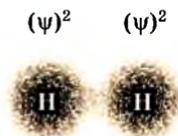


Рис. 6.9

### 6.3.3. Гибридизация

Ионная и ковалентная связи являются двумя крайними случаями. Большинство молекул нельзя безоговорочно отнести к ионным или ковалентным, поэтому часто говорят о ионно-ковалентных связях, подразумевая, что в образовании молекул принимают участие оба рассмотренных выше механизма. Более того, химические свойства очень многих элементов вообще не могут быть объяснены в рамках простых представлений о валентных электронах. Известно, например, что углерод четырехвалентен, и с химической точки зрения все четыре валентных электрона эквивалентны, хотя два из них находятся в состоянии  $2s$ , а два — в состоянии  $2p$ , т. е. по-разному связаны с ядром. Эти свойства обусловлены тем, что молекулу нельзя представлять простой суммой нескольких атомов. Под влиянием других положительно заряженных ядер происходит значительное изменение электронной конфигурации атома. Взаимодействуя друг с другом,

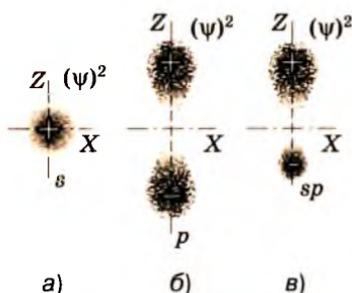


Рис. 6.10

$s$  и  $p$  электроны образуют новые (гибридные)  $sp$ -состояния, эквивалентные между собой. Процесс гибридизации схематически изображен на рис. 6.10. Волновая функция электрона в  $s$ -состоянии сферически симметрична (а), а в  $p$ -состоянии — гантелеобразна (б). При гибридизации образуется сильно вытянутый лепесток (в). Этим объясняется не только равноправие всех валентных связей углерода, но и геометрическое

расположение его атомов в молекулах, поскольку гибридные связи являются направленными.

Возможны и более сложные гибридизации. Некоторые из них приведены в таблице.

Структурный тип молекулы	Валентные электроны	Гибридизация	Конфигурация связи	Пример молекулы
$AB_2$	$s + p$	$sp$	Линейная	$CO_2$
$AB_4^2$	$s + 3p$	$sp^3$	Тетраэдрическая	$CH_4^2$
$AB_6$	$2d + s + 3p$	$d^2sp^3$	Октаэдрическая	$SF_4$

## 6.4. ЖИДКОЕ СОСТОЯНИЕ ВЕЩЕСТВА

### 6.4.1. Строение жидкости

Из предыдущего материала следует, что между двумя нейтральными молекулами также действуют силы притяжения. На

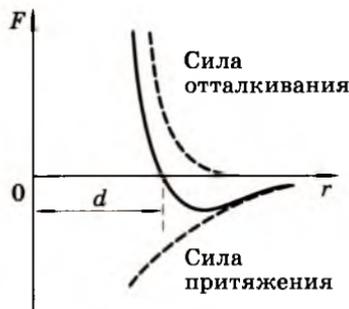


Рис. 6.11

очень малых расстояниях, когда электронные оболочки молекул касаются друг друга, возникают мощные силы отталкивания. Изменение результирующей этих сил с расстоянием между молекулами представлено на рис. 6.11. Соответствующая потенциальная энергия взаимодействия молекул приведена на рис. 6.12. Видно, что силы отталкивания и притяжения на расстоянии  $d$  уравниваются друг друга. Это расстояние принято на-

зывать эффективным диаметром молекулы. Именно на этом расстоянии потенциальная энергия взаимодействия молекул минимальна.

Допустим, что молекулы движутся с очень большими скоростями, такими, что их кинетическая энергия равна  $W_1$  (рис. 6.12). Видно, что  $W_1$  значительно превышает потенциальную энергию притяжения, поэтому молекулы способны удаляться друг от друга на любое расстояние. Они будут взаимодействовать лишь при сближении на расстояние  $d_1$ . Поскольку на

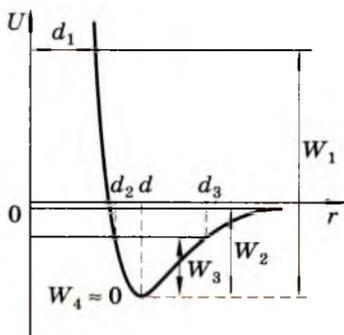


Рис. 6.12

этом расстоянии потенциальная энергия отталкивания превышает  $W_1$ , их взаимодействие носит характер упругого столкновения. **Совокупность молекул, находящихся в таком состоянии, образует идеальный газ.**

Если кинетическая энергия молекул уменьшится до величины  $W_2$ , то они, хотя и сохраняют способность расходиться на большие расстояния, уже будут испытывать некоторое взаимное притяжение — ведь их кинетическая энергия меньше потенциальной энергии притяжения. Совокупность молекул, находящихся в таком состоянии, образует **реальный газ**.

При дальнейшем уменьшении кинетической энергии ( $W_3 < W_2$ ) молекулы уже прочно связаны силами притяжения, хотя еще и могут совершать перемещение в пределах от  $d_2$  до  $d_3$ , т. е. на расстояния, соизмеримые с размерами самих молекул. В этом состоянии молекулы образуют **жидкость**.

Наконец, если кинетическая энергия молекул незначительна ( $W_4 \approx 0$ ), то они оказываются в минимуме потенциальной ямы на расстоянии  $d$  друг от друга, т. е. составляют **твердое кристаллическое тело**. В нем молекулы не могут перемещаться свободно, а лишь совершают колебательные движения.

Газообразное состояние вещества было рассмотрено в третьей главе. В настоящем и следующем разделах мы разберем некоторые свойства жидких и твердых тел.

Итак, жидкое состояние вещества является промежуточным между газообразным, где молекулы почти не связаны друг с другом и движутся хаотически, и кристаллическим, в котором межмолекулярные силы велики и свободное перемещение молекул исключено. Согласно теории, разработанной советским физиком Я. И. Френкелем, каждая молекула жидкости некоторо

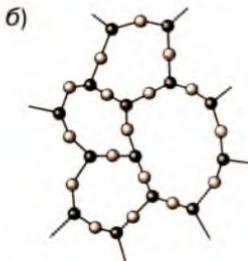
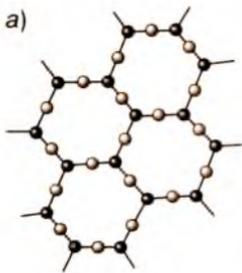


Рис. 6.13

время совершает интенсивные колебания около положения равновесия, а затем скачком перемещается на расстояние, соизмеримое с размером самой молекулы и начинает колебаться около нового положения равновесия. Таким образом, молекулы жидкости, хотя и пребывают какое-то время около определенных мест, все же медленно перемещаются в пространстве.

Промежуточным является и внутреннее строение жидкости. Ближайшее окружение молекулы упорядочено, но на значительном расстоянии порядок в расположении частиц нарушается. Говорят, что в жидкости имеет место *ближний порядок* и не существует *дальний порядок*, характерный для кристаллов. Структуры, в которых соблюдается дальний (а) и ближний (б) порядок, представлены на рис. 6.13. Некоторые вещества и материалы, например, стекло, битум и др. по внешним признакам

могут быть отнесены к твердым телам, однако их внутреннее строение подобно строению жидкости — у них тоже существует только ближний порядок. Такие вещества называются некристаллическими (*аморфными*) или стеклообразными.

При повышении температуры характер расположения атомов в аморфных телах не изменяется. Атомы начинают колебаться более интенсивно, и аморфное тело постепенно размягчается, превращаясь в обыкновенную жидкость. Кристаллические же тела, как известно, характеризуются определенной *точкой плавления* — температурой, при которой скачком разрушается кристаллическая структура, т. е. исчезает дальний порядок в расположении атомов. Разрушение кристаллической решетки требует затраты определенной энергии, которую принято называть теплотой плавления. Указанное свойство позволяет наиболее просто и надежно отличить твердое аморфное тело от кристаллического.

Существуют вещества, которые сочетают в себе свойства жидкостей и кристаллов. С одной стороны, они обладают текучестью, образуют капли и т. д. С другой стороны, они подобно кристаллам обладают анизотропными оптическими и другими свойствами. Такие вещества называются *жидкими кристаллами*. Молекулы жидких кристаллов непременно обладают удлиненной формой. Жидкие кристаллы образуют некоторые виру-

сы, липоиды и другие органические и биоорганические вещества.

Характерными особенностями жидкости являются поверхностное натяжение и вязкость (внутреннее трение).

### 6.4.2. Поверхностное натяжение

Силы взаимного притяжения молекул быстро убывают с расстоянием. Фактически они действуют только между ближайшими частицами, удаленными на расстояние  $r \sim d$ . Если молекула расположена внутри жидкости, то равнодействующая всех действующих на нее межмолекулярных сил равна нулю (рис. 6.14, а). Если же молекула находится на поверхности раздела жидкость — газ, то межмолекулярные силы действуют только «вовнутрь» жидкости, поскольку силами притяжения со стороны молекул газа можно пренебречь (рис. 6.14, б). Каждую из этих сил можно разложить на нормальную и тангенциальную составляющие, равнодействующие которых обозначены на рис. 6.14 соответственно как  $F_n$  и  $F_\tau$ . Видно, что молекула, находящаяся на поверхности, обладает повышенной потенциальной энергией, так как для перевода ее на поверхность надо совершить работу по преодолению силы  $F_n$ . Дополнительная энергия, которой обладают молекулы на поверхности, называется **поверхностной энергией**.

В равновесии любая система обладает минимумом потенциальной энергии. Поэтому в невесомости жидкость принимает форму шара, так как из всех геометрических тел одинакового объема шар обладает наименьшей поверхностью. Форма жидкости, находящейся на плоской поверхности в поле тяготения Земли, также определяется условием минимума полной потенциальной энергии, поэтому мелкие капельки, для которых преобладающую роль играет поверхностная энергия, еще имеют форму, близкую к сфере. Большие капли «сплюсциваются» под действием силы тяготения и растекаются по поверхности.

Силы  $F_\tau$  дополнительно связывают друг с другом молекулы, находящиеся на поверхности. Они называются **силами поверхностного натяжения**. Действие сил поверхностного натяжения можно продемонстрировать следующим образом. Если на мыльную пленку наложить небольшую петлю из тонкой нити (рис. 6.15, а), а затем проткнуть пленку внутри этой петли, то

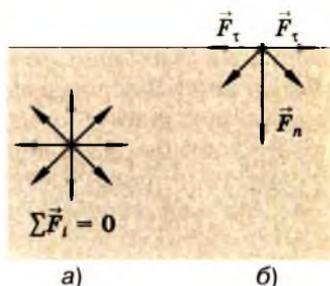


Рис. 6.14

под действием силы поверхностного натяжения петля растянется и примет форму окружности (рис. 6.15, б). Сила поверхностного натяжения пропорциональна длине контура  $dl$ , по которому она действует:

$$F_{\tau} = \alpha dl, \quad (6.13)$$

где  $\alpha$  — коэффициент поверхностного натяжения, численно равный силе поверхностного натяжения, действующей на единицу длины контура. В системе СИ  $\alpha$  измеряется в Н/м.

Между молекулами жидкости и находящимися в соприкосновении с ней молекулами твердого вещества тоже действуют силы притяжения. Если эти силы меньше, чем межмолекулярные силы в жидкости, то жидкость не будет смачивать твердое тело. Если эти силы больше, то наблюдается явление смачивания. Например, ртуть не смачивает стекло, но смачивает цинк. Вода не смачивает парафин, но смачивает стекло, дерево и т. д.

Рассмотрим жидкость, находящуюся в трубочке очень малого диаметра (такие трубочки называются капиллярами). Если жидкость смачивает стенки трубки, то ее поверхность будет изогнутой вниз, а если не смачивает — вверх (рис. 6.16). Такая изогнутая поверхность жидкости называется *мениском*. За счет сил поверхностного натяжения под мениском возникает добавочное давление, которое будет тем выше, чем больше кривизна мениска. Под действием этого давления жидкость в капилляре будет либо подниматься, если она смачивает стенки, либо опускаться, если смачивания нет (рис. 6.17). Высота подъема жидкости в капилляре определяется параметрами капилляра в жидкости:

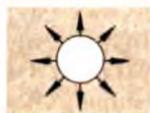
$$h = \frac{2\alpha}{\rho q r}, \quad (6.14)$$

где  $\alpha$  — коэффициент поверхностного натяжения,  $\rho$  — плотность жидкости,  $r$  — радиус кривизны мениска,  $q$  — ускорение свободного падения. В очень тонких капиллярах и при хорошем смачивании жидкость может подниматься на десятки метров.

Капиллярные явления занимают в природе исключительно важное место. Все рыхлые и пористые тела легко пропитываются



а)



б)

Рис. 6.15



Рис. 6.16

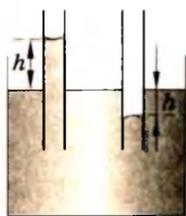


Рис. 6.17

ся смачивающими жидкостями и непроницаемы для несмачивающих жидкостей, например, перья и пух водоплавающих птиц не намокают. Благодаря капиллярности поднимается влага в почве из глубинных слоев к поверхности. Этому же явлению обязан подъем питательного раствора в растениях. Большую роль играют капилляры и в живых организмах.

### 6.4.3. Внутреннее трение

В жидкости, как и в газе, существует внутреннее трение. Силу внутреннего трения можно обнаружить, если поместить в поток движущейся жидкости некоторую площадку  $\Delta S$  (рис. 6.18). В разделе 3.4 показано, что сила внутреннего трения определяется выражением (3.37). Для случая, представленного на рис. 6.18, это выражение можно конкретизировать так:

$$F = -\eta \frac{v_2 - v_1}{x_2 - x_1} \Delta S. \quad (6.15)$$

Напомним, что отношение  $\frac{v_2 - v_1}{x_2 - x_1} = \frac{\Delta v}{\Delta x}$  называется градиентом скорости, который показывает быстроту изменения  $v$  вдоль направления « $x$ », перпендикулярного направлению движения потока;  $\eta$  — *коэффициент внутреннего трения (вязкости)* жидкости. Численно он равен силе, действующей на единицу площади при единичном градиенте скорости. В системе СИ коэффициент вязкости измеряется в  $\text{Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2$ .

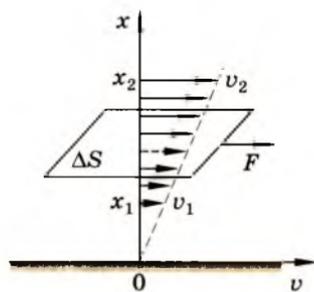


Рис. 6.18

В частном случае движения тела сферической формы с малой скоростью  $v$  сила внутреннего трения определяется законом Стокса:

$$F = 6\pi r \eta v, \quad (6.16)$$

где  $r$  — радиус сферического тела. Формула Стокса часто употребляется для определения коэффициента вязкости жидкостей.

Весьма специфическими свойствами обладает жидкий гелий при температуре  $T < 2,2$  К. В этих условиях его вязкость неизмеримо мала и гелий становится сверхтекучим. В сверхтекучем состоянии гелий не оказывает никакого механического воздействия на помещенные в него тела. Он обтекает их без трения. Это явление было открыто П. Л. Капицей в 1929 г. и теоретически объяснено Л. Д. Ландау на основе квантовой механики.

#### 6.4.4. Движение вязкой жидкости

Движущаяся вязкая жидкость совершает работу по преодолению сил внутреннего трения. Это сопровождается уменьшением механической энергии жидкости  $E = U + W$ . Очевидно, что равномерное движение жидкости по горизонтальной трубе будет возможно только в том случае, когда в начале своего пути она имела некоторый запас потенциальной энергии. По мере удаления жидкости от начальной точки потенциальная энергия будет уменьшаться на величину совершенной жидкостью работы. Это явление можно наблюдать с помощью опыта, представленного на рис. 6.19.

Типичным представителем вязкой жидкости является кровь. В связи с этим для биологии, например, особый интерес представляет движение вязкой жидкости по разветвленным сосудам с эластичными стенками. Именно в таких условиях движется кровь в живых организмах. Исследования показали, что в разветвленных трубках потери на внутреннее трение значительно больше, чем в одной трубе такого же сечения. Это означает, что на разветвленных участках жидкость тормозится больше и ее скорость уменьшается. Особенно мала скорость движения крови в капиллярах, пронизывающих легкие и другие органы человека. Последнее обстоятельство имеет принципиальное значение, поскольку в капиллярах происходит газообмен крови.

Кровь в организме человека движется за счет работы, совершаемой сердцем, которое является периодически действующим нагнетательным насосом. Сокращение сердечной мышцы (систолы) чередуется с более длительным расслаблением (диастолой), когда сердце отдыхает. Несмотря на то что кровь выталкивается в кровеносную систему толчками, она движется по сосудам непрерывно. Непрерывное движение крови обусловлено эластичностью стенок кровеносных сосудов. Упругое растяжение и сокращение стенок также обеспечивает экономное расходование энергии, развиваемой сердечной мышцей.

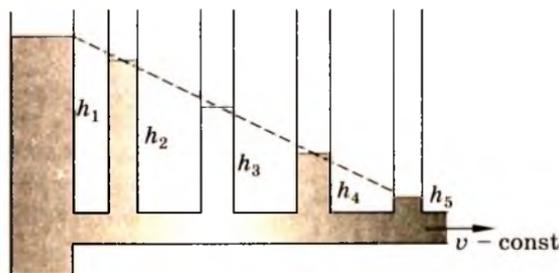


Рис. 6.19

## 6.5. КРИСТАЛЛИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО

Благодаря тому, что в кристаллах атомы (или молекулы) сохраняют дальний порядок, твердые тела обладают многими специфическими свойствами. Например, кристаллы имеют способность самоограняться, т. е. в процессе своего роста приобретать правильные геометрические формы, характеризующиеся определенной симметрией. Кристаллическая структура во многом определяет и физические свойства вещества. Примером могут служить две кристаллические модификации углерода: алмаз и графит, структурно отличающиеся только расположением атомов в кристаллической решетке.

В настоящей главе вопросы кристаллохимии и кристаллографии излагаться не будут. Познакомимся лишь с некоторыми электрофизическими свойствами кристаллов.

### 6.5.1. Статистика электронов в металлах

Классические представления о металле, как о решетке, построенной из положительных ионов и погруженной в электронный газ (см. раздел 4.2), оказались несостоятельными при объяснении многих свойств. Например, молярная теплоемкость металлов при достаточно высокой температуре по классической теории должна быть равна  $\frac{9}{2}R$  и в полтора раза превышать теплоемкость диэлектриков. На самом же деле она составляет  $\frac{6}{2}R$  и практически не отличается от теплоемкости диэлектрических материалов.

Недостатки классической теории металлов обусловлены тем, что свойства электронного газа в этой теории отождествлялись со свойствами идеального газа. Например, при рассмотрении закона Ома в дифференциальной форме (раздел 4.2) мы опирались на законы Ньютона и выводы из статистики Максвелла—Больцмана. На самом же деле электронный газ в металле представляет квантово-механическую систему, для которой справедлив принцип Паули. Это означает, что среди огромного числа свободных электронов в металле не может быть даже двух, находящихся в одинаковом состоянии. Поскольку спиновое квантовое число равно  $\pm 1/2$ , на любом энергетическом уровне могут находиться только два электрона с противоположными спинами, тогда как по классической статистике Максвелла—Больцмана любой энергией может обладать любое число частиц. Кроме того, по классическим представлениям при 0 К энергия всех частиц равна нулю, тогда как по принципу Паули такие значения энергии могут иметь только два электрона, а все остальные обладают энергией, отличной от нуля.

Э. Ферми (1901—1954) и П. Дирак (1902—1984) показали, что электроны в металле подчиняются иной статистике, названной впоследствии статистикой Ферми—Дирака. Вероятность заполнения энергетического уровня  $E$  по этой статистике определяется функцией Ферми:

$$f(E) = \frac{1}{e^{\frac{E-E_f}{kT}} + 1}, \quad (6.17)$$

где  $E_f$  — называется энергией Ферми или *уровнем Ферми*. Легко убедиться, что при 0 К вероятность заполнения электронами энергетических уровней, лежащих ниже  $E_f$  ( $E < E_f$ ) равна 1, а лежащих выше  $E_f$  ( $E > E_f$ ) равна 0. Графически функция Ферми представлена на рис. 6.20. Можно сказать, что  $E_f$  соответствует максимальной энергии, которой обладают электроны в металле при абсолютном нуле температур. Величина энергии Ферми зависит от числа электронов в статистической системе (в данном случае в металле). Обычно  $E_f$  составляет несколько электрон-вольт. При повышении температуры электроны получают дополнительную кинетическую энергию  $\bar{\epsilon} = \frac{3}{2} kT$ , которая даже при  $T = 10^3$  К не превышает 0,1 эВ. По этой причине с ростом температуры характер распределения электронов по энергиям существенно не меняется. Появляется лишь небольшое число частиц, энергия которых превышает  $E_f$  (рис. 6.20, штриховая кривая). Изменение энергии электронов в металле с ростом температуры схематически представлено на рис. 6.21 сплошной линией. Штриховая линия соответствует изменению энергии электронов по классическим представлениям.

Поскольку энергия электронов при нагревании металла почти не возрастает, электронный газ не дает существенного вклада в теплоемкость металлов, и она, как было сказано выше, оказывается равной теплоемкости диэлектриков.

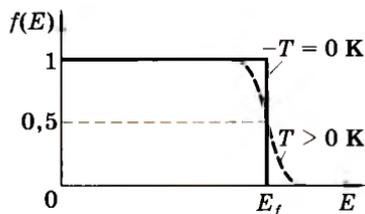


Рис. 6.20

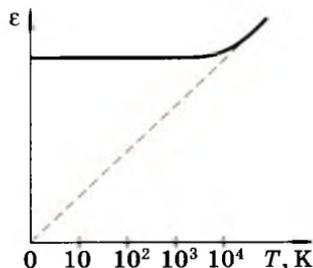


Рис. 6.21

Статистике Ферми—Дирака подчиняются не только электроны, но и другие частицы, спин которых равен  $1/2$  (нейтроны, протоны и др.). Частицы, спин которых равен  $1$ , например, фотоны, подчиняются статистике Бозе—Эйнштейна. Функция распределения Бозе—Эйнштейна имеет вид

$$f(E) = \frac{1}{e^{\frac{E-E_f}{kT}} - 1}. \quad (6.18)$$

При очень высоких температурах, когда  $E - E_f \gg kT$ , обе квантовые статистики переходят в классическую статистику Максвелла—Больцмана.

### 6.5.2. Термоэлектронная эмиссия

Как было сказано выше, для вырывания электрона из металла необходимо совершить определенную работу. Это означает, что потенциальная энергия электрона внутри металла меньше, чем вне его, т. е. электроны в металле находятся в потенциальной яме (рис. 6.22); энергия электронов вне металла полагается равной нулю. Даже при  $0\text{ К}$  электроны будут заполнять энергетические уровни вплоть до  $E_f$ . Соответствующая этому случаю функция Ферми изображена на рис. 6.22, *a* сплошной линией. Работу выхода (работу по вырыванию электрона из металла) можно найти как

$$\varphi = E_0 - E_f. \quad (6.19)$$

При достаточно высокой температуре ( $T \gg 0\text{ К}$ ) функция Ферми принимает вид, изображенный на рис. 6.22, *a* штриховой линией. Видно, что появляется некоторое число электронов с энергией, превышающей работу выхода ( $E > \varphi$ ), т. е. способных покинуть металл. Явление выхода электронов из твердых и жидких тел при нагревании называется *термоэлектронной эмиссией*.

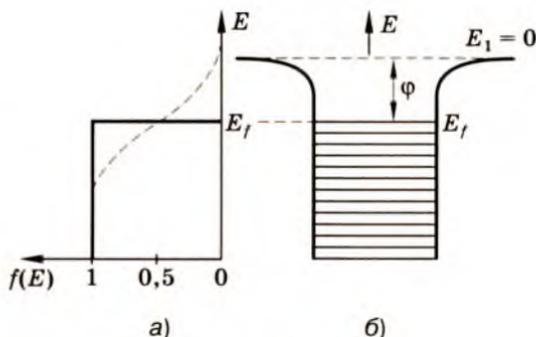


Рис. 6.22

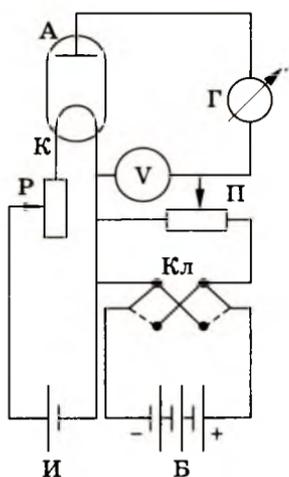


Рис. 6.23

Рассмотрим вакуумный диод — двухэлектродную электронную лампу (рис. 6.23). Между анодом А и катодом К от батареи Б подается разность потенциалов. Величину анодного напряжения можно регулировать потенциометром П, а посредством ключа Кл можно изменять его знак. Катод разогревается током от источника И. Величина этого тока, а, следовательно, и температура катода регулируется реостатом Р. При достаточно высокой температуре катода в анодной цепи протекает ток, обусловленный термоэлектронной эмиссией. Зависимость термоэмиссионного тока от анодного напряжения представлена на рис. 6.24. На кривой  $I_a = f(V)$ , называемой вольт-амперной характеристикой, можно выделить три участка.

При достаточно большом напряжении наблюдается насыщение тока (участок III). Диодный ток перестает зависеть от анодного напряжения, так как все эмиттированные катодом электроны достигают анода.

При меньших значениях  $V$  часть вылетевших из катода электронов скапливается в пространстве между катодом и анодом, образуя пространственный заряд (в виде электронного облака), который препятствует попаданию электронов на анод. На этом участке (II) ток в цепи изменяется пропорционально напряжению в степени  $3/2$  (закон Лэнгмюра—Богуславского):

$$I_a = V^{3/2}. \quad (6.20)$$

Из рис. 6.24 видно, что при  $V = 0$  ток в цепи еще не прекращается. Дело в том, что эмиттированные электроны по выходе из катода обладают некоторой собственной скоростью и часть из них способна долететь до анода даже в отсутствии ускоряющего поля.

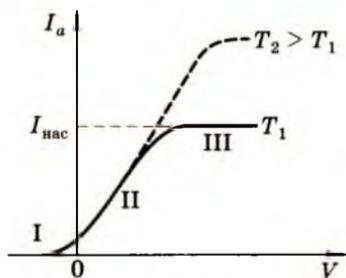


Рис. 6.24

Анодный ток может стать равным нулю лишь при некотором отрицательном потенциале анода (участок I на вольт-амперной характеристике).

С изменением температуры катода ток насыщения изменяется в соответствии с законом Ричардсона:

$$I_{\text{нас}} = AT^2 e^{\frac{\phi}{kT}}, \quad (6.21)$$

где  $A = 1,2 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2 \cdot \text{град}^2$  — константа, не зависящая от рода металла,  $\phi$  — работа выхода, наоборот, зависящая от рода металла.

Термоэлектронная эмиссия играет чрезвычайно важную роль в современной технике. Это явление используется для получения свободных электронов, электронных потоков (электронных лучей) в электронных лампах различного назначения, в электронно-лучевых трубках, в рентгеновских аппаратах и т. д.

### 6.5.3. Зонная теория твердых тел

Изложенные выше квантово-механические представления об электронном газе также являются несколько упрощенными и не могут объяснить всего многообразия электрических свойств твердых тел, например, существование и специфические особенности металлов, полупроводников, диэлектриков. Для более полной характеристики твердых тел в настоящее время привлекают зонную теорию.

В разделе 6.1 было показано, что в изолированном атоме электроны находятся в потенциальной яме, а их энергия дискретна, причем в одинаковых атомах энергетический спектр электронов идентичен (рис. 6.25). При сильном сближении двух атомов потенциальный барьер, разделяющий их, станет в силу туннельного эффекта проницаем для электронов. Электроны, принадлежащие разным атомам, начнут взаимодействовать друг с другом, поэтому оба атома будут уже представлять одну квантово-механическую систему. Так как по принципу Паули в такой системе не может быть электронов в одинаковых состояниях, каждый энергетический уровень расщепляется на два (рис. 6.26).

При тесном сближении трех атомов энергетические уровни расщепятся на три подуровня и т. д. Поскольку в кристалле со-

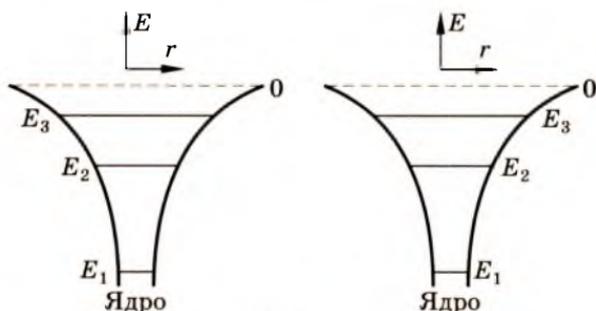


Рис. 6.25

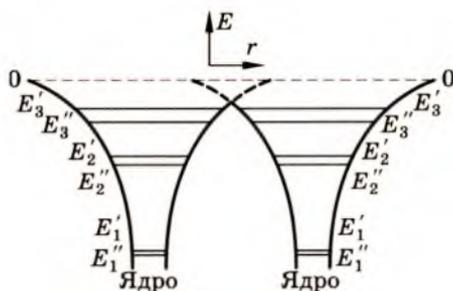


Рис. 6.26

держится  $N$  атомов, каждый разрешенный уровень расщепляется на  $N$  очень близких уровней, образующих квазинепрерывную энергетическую зону. Разрешенные энергетические зоны разделяются запрещенными зонами, которые соответствуют запрещенным промежуткам энергии в атоме. Внутренние, сильно связанные с ядром электроны при сближении атомов практически не испытывают взаимодействия, и их энергетические уровни расщепляются незначительно. Поэтому обычно ограничиваются рассмотрением только валентных электронов. Образование энергетических зон при сближении  $N$  атомов схематически представлено на рис. 6.27.

Зона, образованная при расщеплении основного энергетического состояния валентного электрона, называется **валентной**. Зона, которая возникает при расщеплении первого возбужденного состояния валентного электрона называется **свободной**. Действительно, в невозбужденном состоянии электронов в этой зоне нет. Валентная и свободная зоны изображены на рис. 6.28. Потолок валентной зоны обозначим  $E_v$ , а дно свободной зоны  $E_c$ . Величина  $\Delta E = E_c - E_v$  называется шириной запрещенной зоны.

Рассмотрим, как в различных веществах заполняется валентная зона. В кристалле, содержащем  $N$  атомов, каждая зона

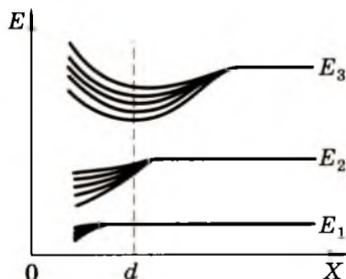


Рис. 6.27

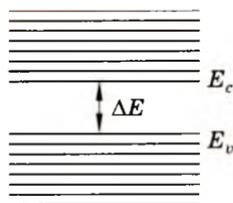


Рис. 6.28

состоит из  $N$  уровней. Если в каждом атоме содержится по одному валентному электрону, например в атоме натрия, то они займут лишь  $\frac{N}{2}$  нижних уровней, так как на каждом из них расположатся по два электрона с противоположными спинами (см. рис. 6.29, а). Если же в каждом атоме содержится два валентных электрона, то все  $N$  уровней будут заполнены электронами (рис. 6.29, б, в).

Легко себе представить, что произойдет при наложении электрического поля на кристалл с незаполненной валентной зоной. Электроны в этом случае смогут приобрести некоторую дополнительную энергию (перейдя на более высокие энергетические уровни) и начать направленное движение, создавая электрический ток. Иными словами, вещества с незаполненной валентной зоной являются металлами\*.

В случае же полного заполнения валентной зоны электроны во внешнем электрическом поле не могут прийти в движение, и такие материалы будут непроводящими. Если при этом ширина запрещенной зоны велика (рис. 6.29, б), вещество является диэлектриком, а при малом значении  $\Delta E$  — полупроводником (рис. 6.29, в).

С другой стороны, известно, что абсолютно непроводящих материалов не существует. Даже самые хорошие диэлектрики обладают некоторой проводимостью. В рамках зонной теории это обстоятельство находит следующее объяснение. Распределение электронов по энергетическим уровням, изображенное на рис. 6.29, справедливо лишь при 0 К. С ростом температуры некоторые электроны могут получить дополнительную энергию  $E > \Delta E$  и попасть из валентной зоны в свободную зону, тем самым получив возможность двигаться и проводить электрический ток. Поэтому свободную зону часто называют **зоной проводимости**. Чем уже ширина запрещенной зоны, тем больше электронов окажется в свободной зоне, тем выше будет проводимость материала.

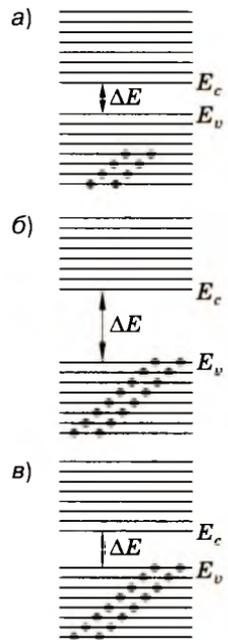


Рис. 6.29

\* Некоторые двухвалентные элементы, например, Be и др., относятся к металлам, несмотря на то, что их валентная зона заполнена. Дело в том, что в таких металлах валентная зона перекрывается со свободной, и в энергетическом спектре электронов (как и в одновалентных металлах) имеются свободные состояния.

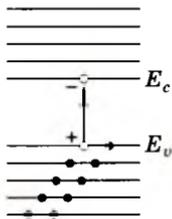


Рис. 6.30

Природа проводимости в полупроводниках и диэлектриках одна и та же, поэтому четкой границы между ними не существует. Материалы с  $\Delta E < 2$  эВ условились относить к полупроводникам, а с  $\Delta E > 2$  эВ — к диэлектрикам.

Проводимость полупроводников и диэлектриков обладает еще одной особенностью по сравнению с проводимостью металлов. Вернемся к зонной диаграмме полупроводника. Из рис. 6.30 видно, что на месте ушедшего в свободную зону электрона остается положительно заряженная вакансия — **дырка** (рис. 6.30). На эту вакансию может перейти соседний электрон, и дырка пространственно переместится. Итак, перемещение электронов в валентной зоне на вакантные места от атома к атому эквивалентно движению дырки. Иными словами, в полупроводниках есть два сорта носителей тока: **электроны** и **дырки**. Физически переход электрона из валентной зоны в зону проводимости означает, что он покинул атом и стал свободным. «Движение дырки» — разумеется, условное понятие. В полупроводниках и диэлектриках движутся лишь электроны, а ионы кристаллической решетки, как правило, неподвижны. В этих условиях свободное перемещение электронов считается их собственным движением, а переход электрона от иона к иону — движение дырок.

Концентрация электронов в той или иной зоне определяется статистикой Ферми—Дирака. При 0 К уровень Ферми в металле совпадает с энергетическим уровнем, на котором находятся электроны с максимальной энергией (рис. 6.31). В полупроводниках и диэлектриках уровень Ферми располагается в этом случае посередине запрещенной зоны (рис. 6.32). Из этого же рисунка видно, что с повышением температуры вероятность нахождения электронов в свободной зоне возрастает.

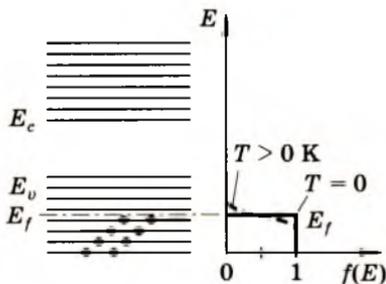


Рис. 6.31

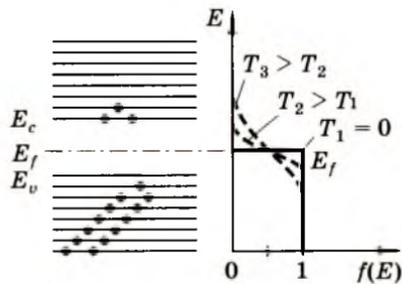


Рис. 6.32

Зонная теория позволяет объяснить экспериментально наблюдаемое различие температурных зависимостей электропроводности  $\sigma$  металлов (1) и полупроводников (2) (рис. 6.33). В полупроводниках с увеличением  $T$  растет число свободных носителей, что сопровождается ростом  $\sigma$ . В металлах же концентрация свободных электронов велика, и с ростом температуры она не увеличивается, зато значительно усиливается рассеяние электронов на тепловых колебаниях решетки. Это приводит к уменьшению электропроводности.

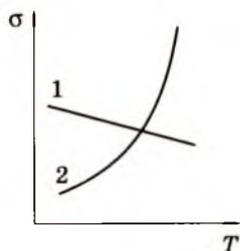


Рис. 6.33

### 6.5.4. Полупроводники

Выше рассматривались чистые беспримесные диэлектрики и полупроводники. Видно, что в таких полупроводниках число свободных электронов равно числу свободных дырок. Беспримесные полупроводники, как и носители заряда в них, называются *собственными*. Свойства полупроводников можно изменять путем введения в них примесей. Для определенности рассмотрим полупроводник, состоящий из четырехвалентных атомов, например Ge. Введем в него некоторое количество пятивалентных атомов фосфора. Один из таких атомов, замещающий в кристаллической решетке атом германия, изображен на рис. 6.34. Четыре валентных электрона фосфора принимают участие в образовании обычной связи в кристалле, а пятый оказывается неиспользованным. Этот электрон слабее других связан с атомом фосфора и довольно легко может его покинуть (перейти в свободную зону). Оставшееся вакантное место связано с атомом фосфора и не может принять участие в электропроводности. Примеси, легко отдающие электроны в свободную зону, называются *донорными*, а полупроводники, содержащие до-

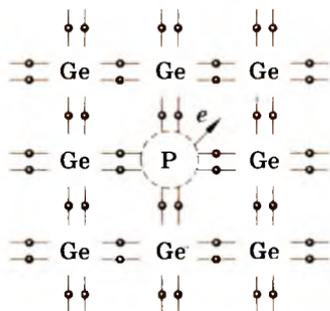


Рис. 6.34

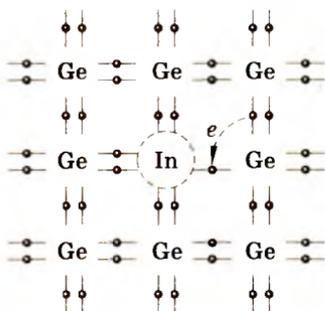


Рис. 6.35

норную примесь, — *электронными* полупроводниками или полупроводниками *n*-типа.

Введение в германий трехвалентной примеси приводит к иному эффекту. На рис. 6.35 изображен атом индия, замещающий в кристаллической решетке атом германия. Для образования нормальной связи атому индия недостает одного электрона, который может быть позаимствован у соседнего атома германия. Образовавшаяся электронная вакансия (дырка) будет подвижной, поскольку она может быть замещена электроном от другого атома Ge и т. д. Электрон, перешедший к индию, наоборот, оказывается связанным с примесным атомом, т. е. неподвижным. Примеси, которые могут легко принимать электроны из валентной зоны, называются *акцепторными*. Полупроводники с акцепторной примесью называются полупроводниками *p*-типа, или дырочными полупроводниками.

Итак, в полупроводниках *n*-типа свободными носителями являются электроны, а в полупроводниках *p*-типа — дырки.

Поскольку концентрация примесных атомов мала, и они отстоят друг от друга достаточно далеко, их волновые функции не перекрываются, следовательно, энергетические уровни, созданные примесями, будут дискретны. На рис. 6.36 изображена запрещенная зона полупроводников *n*- и *p*-типов. Энергетический интервал между примесным уровнем  $E_t$  и соответствующей зоной ( $\Delta E_t = E_c - E_t$  или  $\Delta E_t = E_t - E_v$ ) называется *энергией активации*.

Уровень Ферми в примесных полупроводниках уже не находится в середине запрещенной зоны. При 0 К он располагается между энергетическим уровнем примеси и соответствующей зоной. С повышением температуры  $E_f$  сдвигается к центру запрещенной зоны. Если все электроны с донорных уровней перешли

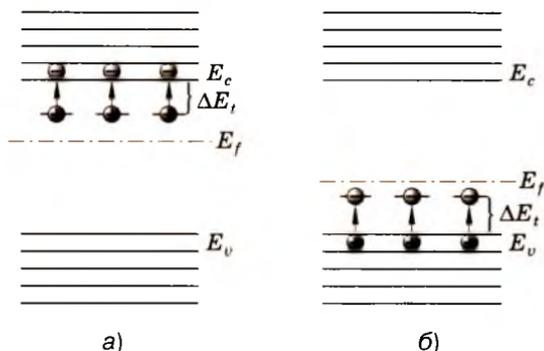


Рис. 6.36

в зону проводимости, уровень Ферми расположен несколько ниже уровня примеси (рис. 6.36, а). В дырочном полупроводнике  $E_f$  будет расположен несколько выше примесного уровня, если все акцепторные центры заполнены электронами (рис. 6.36, б).

В общем случае в полупроводнике могут быть и донорные и акцепторные примеси. Проводимость в таких полупроводниках будет смешанной, т. е. будет осуществляться как электронами, так и дырками. Носители, концентрация которых выше, называются *основными*. Очевидно, что в полупроводнике  $n$ -типа основными являются электроны, а неосновными — дырки. В полупроводнике  $p$ -типа, наоборот, дырки — основные, а электроны — неосновные носители. Важнейшей технологической задачей является получение примесных полупроводников с заранее заданными и контролируруемыми свойствами (концентрацией носителей, типом проводимости, величиной электропроводности и т. п.).

Особый интерес представляет контакт дырочного и электронного полупроводников, называемый  *$p-n$ -переходом*. Как сказано выше, в полупроводнике  $p$ -типа уровень Ферми расположен в нижней половине запрещенной зоны, а в полупроводнике  $n$ -типа — в верхней. Зонная схема двух таких полупроводников до соприкосновения друг с другом изображена на рис. 6.37, а. Приведем эти полупроводники в тесный контакт. Поскольку в  $n$ -области больше электронов, а в  $p$ -области больше дырок, то электроны будут частично проникать в  $p$ -область, а дырки — в  $n$ -область. В результате этого  $p$ -область получит отрицательный заряд, а  $n$ -область — положительный. Потенциал  $p$ -области понизится, а  $n$ -области возрастет. Потенциальная энергия электронов, равная произведению потенциала на заряд, наоборот, в  $p$ -области возрастет, а в  $n$  — уменьшится, так как заряд электрона отрицательный. Возникшее электрическое поле будет препятствовать дальнейшему переходу зарядов. Из статистики известно, что равновесие наступит тогда, когда уровни Ферми в обоих полупроводниках уравниваются. Зонная схема  $p-n$ -перехода в равновесном состоянии представлена на рис. 6.37, б.

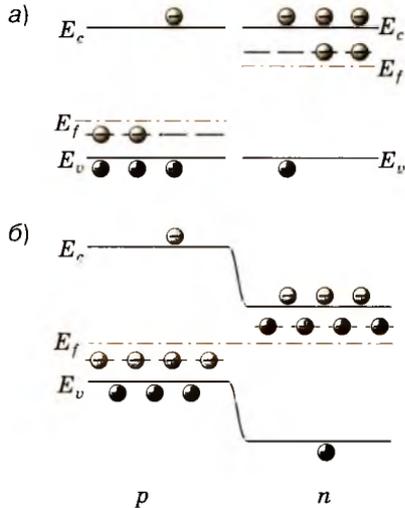


Рис. 6.37

Видно, что для основных носителей  $p$ — $n$ -переход представляет потенциальный барьер.

На практике  $p$ — $n$ -переход получают путем введения в электронный полупроводник акцепторной примеси, или в дырочный полупроводник — донорной примеси. Полупроводниковый прибор, в котором реализован  $p$ — $n$ -переход, называется полупроводниковым диодом. Такой диод пропускает электрический ток практически только в одном направлении.

Рассмотрим этот вопрос подробнее. Через  $p$ — $n$ -переход протекают два вида тока.

Во-первых, основные носители (электроны в  $n$ -области и дырки в  $p$ -области) будут диффундировать через потенциальный барьер. Процесс диффузии носителей заряда в полупроводнике подобен диффузии молекул в газе или в жидкости. На рис. 6.38 движение основных носителей показано сплошными стрелками.

Во-вторых, неосновные носители заряда будут двигаться через  $p$ — $n$ -переход под действием внутреннего ускоряющего поля. На рис. 6.38 движение неосновных носителей показано штриховыми стрелками.

В равновесии суммарный ток через  $p$ — $n$ -переход равен нулю. Если сообщить  $n$ -области отрицательный потенциал, а  $p$ -области — положительный, то потенциальный барьер для основных носителей уменьшится, следовательно, диффузионный ток через  $p$ — $n$ -переход резко возрастет. При обратной полярности приложенного напряжения потенциальный барьер увеличивается и ток диффузии основных носителей практически прекращается. В этом случае через  $p$ — $n$ -переход могут проходить только неосновные носители. Так как неосновных носителей мало, то и ток будет незначительным. Вольт-амперная характеристика полупроводникового диода представлена на рис. 6.39. Пра-

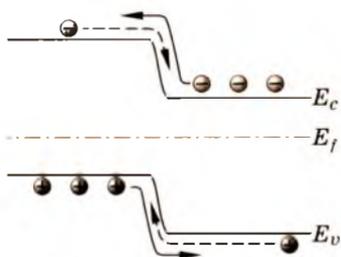


Рис. 6.38

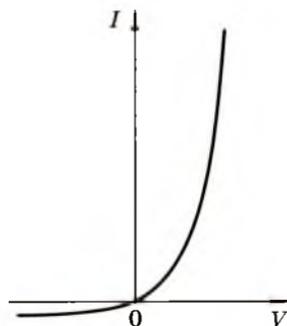


Рис. 6.39

вая ветвь соответствует положительному потенциалу  $p$ -области, а левая — отрицательному. В первом случае говорят, что напряжение приложено в *пропускном* направлении, а во втором, — в *запорном*.

Полупроводниковые приборы, имеющие два  $p-n$  перехода, называются полупроводниковыми *триодами* или *транзисторами*. Зонная схема транзистора представлена на рис. 6.40. Одна из  $p$ -областей называется *эмиттером*, а другая — *коллектором*,  $n$ -область носит название *базы*. Одна из возможных схем включения транзистора  $p-n-p$  типа изображена на рис. 6.41. Транзистор включается так, чтобы дырки из эмиттера легко проникали в базу, т. е. эмиттерный переход включается в пропускном направлении. Поскольку база делается очень тонкой ( $\sim 10^{-3}$  см), то дырки быстро оказываются в поле коллекторного  $p-n$  перехода и почти все попадают на коллектор. Иными словами, токи через переход эмиттер—база и база—коллектор приблизительно равны друг другу ( $I_э = I_к$ ). Однако сопротивление коллекторного перехода  $R_к$  во много раз превышает сопротивление эмиттерного перехода  $R_э$ , поскольку он включен в запорном направлении. Допустим, что в эмиттерной цепи произошло некоторое изменение тока  $\Delta I_э$ . Изменение падения напряжения в этой цепи составит  $\Delta V_э = \Delta I_э R_э$ . Соответственно в коллекторной цепи падение напряжения изменится на величину  $\Delta V_к = \Delta I_к R_к$ , или

$$\frac{\Delta V_к}{\Delta V_э} = \frac{R_к}{R_э}, \quad (6.22)$$

т. е. изменение напряжения в коллекторной цепи будет во столько раз больше вызвавшего его изменения напряжения в цепи эмиттер—база, во сколько раз сопротивление коллекторного перехода больше сопротивления эмиттерного перехода. Соответственно возрастает и мощность в цепи коллектора. Итак, в данном случае транзистор является усилителем напряжения и мощности.

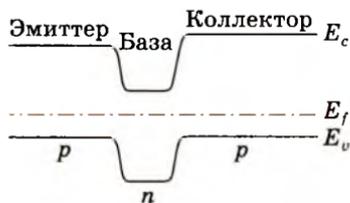


Рис. 6.40

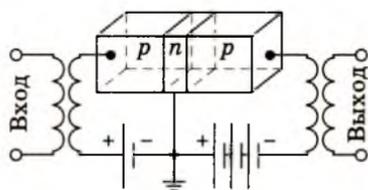


Рис. 6.41

Полупроводники находят исключительно широкое и важное применение. Они используются в различного рода радиотехнических и электронных схемах, в автоматике, в вычислительной технике, в электрофотографии (ксерокопирование), в качестве датчиков для измерения освещенности, температуры и т. д. Класс полупроводниковых материалов очень широк. В последнее время созданы органические полупроводники. Кроме того, оказалось, что и некоторые биологические системы можно рассматривать как полупроводники; в частности, к биополимерам применима зонная теория. Биологические исследования показали, что процессы в упорядоченных биологических структурах нельзя до конца понять, если не рассматривать биополимер с позиций физики твердого тела. Ничего удивительного в этом нет. Ведь молекула белка состоит из миллионов атомов и представляет, подобно кристаллу, квантовомеханическую систему. Существует несколько моделей молекулы белка: в виде полипептидной цепочки с чередованием связей  $—C=O\dots H-N—$ ; в виде полипептидной спирали; в виде системы, состоящей из полипептидных групп, соединенных водородной связью и др. Ширина запрещенной зоны в молекуле белка составляет по различным данным от 3 до 5 эВ. Было установлено, что белки обладают дырочной проводимостью с энергией активации акцепторов  $\sim 2,5—3$  эВ. Многие факты указывают на то, что дырки и электроны принимают участие в биологических процессах.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И УПРАЖНЕНИЯ

1. Молекула водорода имеет четыре взаимодействующие частицы (два протона и два электрона), а в случае молекулы NaCl имеется уже 30 взаимодействующих частиц. Как же возможно рассчитать движение такого большого числа частиц?

2. Каким образом электронов в твердом теле может быть в два раза больше, чем уровней энергий? Как может на  $N$  уровнях находиться  $2N$  электронов?

3. По теории Планка, энергия всегда излучается квантами. Значит ли это, что энергия излучения всегда кратна целому числу некоторых основных единиц энергии?

4. Очевидно, что на молекулу, которая находится на поверхности жидкости, действует результирующая сила со стороны других молекул, направленная вглубь жидкости. Почему эта молекула не движется внутрь жидкости с ускорением?

5. Известно, что мыло уменьшает поверхностное натяжение воды. Почему же выдувают мыльные, а не водяные пузыри?

6. Что должно сильнее зависеть от температуры — сопротивление металла или полупроводника? Почему?

7. Рассчитать три первых боровских радиуса электрона в атоме водорода. *Примечание.* Эту и следующую задачу решить в системе СИ. При переходе в СИ из системы СГС в выражении (6.8) появляется множитель  $4\pi\epsilon_0$ .

8. Рассчитать три первых боровских радиуса электрона в однократно ионизированном атоме гелия.

9. Сколько линий может появиться в спектре испускания водорода, если его атомы возбудили в состоянии с  $n = 4$ ?

10. Какую минимальную энергию нужно сообщить атому водорода, чтобы привести его в возбужденное состояние? *Примечание.* Предварительно получить выражение для полной энергии атома в системе СИ.

11. Рассчитать ионизационный потенциал атома водорода — энергию, необходимую для освобождения электрона.

12. Записать электронные конфигурации элементов второго периода таблицы Менделеева.

13. Определить плотность тока насыщения в вакуумном диоде при температуре 1000 К. Работа выхода электрона из катода составляет 4,5 эВ. Сколько электронов покидает катод каждую секунду?

14. Ширина запрещенной зоны полупроводника составляет 2,0 эВ. Определить длину волны света, способность возбудить электрон из валентной зоны в свободную.

15. Какой максимальной скорости может достичь дождевая капля диаметром 0,25 мм? Вязкость воздуха  $\eta$  принять равной  $1,3 \cdot 10^{-4} \text{ Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2$ .

## СТРОЕНИЕ ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

### 7.1. СВОЙСТВА И СТРОЕНИЕ ЯДРА

Ядерная физика, занимающаяся изучением свойств и строения атомных ядер, является в настоящее время передним краем физической науки. Несмотря на то что данный раздел физики нельзя считать законченным и в нем остается много нерешенных проблем, достижения в этой области огромны и с успехом используются в медицине, биологии, энергетике и т. д.

#### 7.1.1. Свойства ядер

В предыдущей главе ядро рассматривается в целом — как массивная положительно заряженная центральная часть атома, обладающая исключительно малыми размерами ( $\sim 10^{-13}$  см). Однако установлено, что ядро является сложным образованием. Оно состоит из частиц двух сортов: протонов ( $p$ ) и нейтронов ( $n$ ), называемых вместе **нуклонами**. **Протон** обладает положительным электрическим зарядом, численно равным заряду электрона. Масса  $m_p$  покоящегося протона в 1836 раз превышает массу  $m_e$  покоя электрона\*. Масса **нейтрона** лишь на  $3m_e$  превышает  $m_p$  ( $m_n = 1839m_e$ ), при этом нейтроны не имеют электрического заряда. Заряд ядра, а следовательно и порядковый номер элемента в периодической таблице определяется числом протонов ( $Z$ ), входящих в состав ядра\*\*, потому  $Z$  называется **зарядовым числом**. Полное число нуклонов в ядре  $A = N + Z$  (где  $N$  — число нейтронов) называется **массовым числом**. Используя эти понятия, ядро какого-либо элемента ( $X$ ) обозначают следующим символом —  ${}_Z X^A$  ( ${}_1\text{H}^1$ ,  ${}_8\text{O}^{16}$ ,  ${}_{92}\text{U}^{235}$  и др.). Элементы, ядра атомов

\* В ядерной и атомной физике часто используют атомную единицу массы (1 а. е. м. =  $1,86 \cdot 10^{-27}$  кг), что с достаточно хорошим приближением равно массе протона. Масса электрона составляет  $5,49 \cdot 10^{-4}$  а. е. м.

\*\*Самое простое ядро — ядро атома водорода — состоит только из одного протона.

которых имеют одинаковое число протонов, но отличаются количеством нейтронов, называются *изотопами*. Каждый химический элемент имеет, как правило, по несколько изотопов. Например, известны четыре изотопа водорода:  ${}_1\text{H}^1$  — протий,  ${}_1\text{H}^2$  — дейтерий,  ${}_1\text{H}^3$  — тритий,  ${}_1\text{H}^4$  — четырехнуклонный водород. Самый тяжелый из естественных элементов — уран — имеет три изотопа:  ${}_{92}\text{U}^{233}$ ,  ${}_{92}\text{U}^{235}$ ,  ${}_{92}\text{U}^{238}$ .

### 7.1.2. Природа ядерных сил

Строение ядра не может быть объяснено с помощью рассмотренных до сих пор сил (гравитационных или электромагнитных). Действительно, между протонами, находящимися в ядре на расстоянии  $\sim 10^{-13}$  см, из-за одноименных зарядов возникают колоссальные силы отталкивания, которые в  $10^{38}$  раз превышают силы гравитационного притяжения. Очевидно, что между протонами (и вообще нуклонами) должны действовать специфические *ядерные силы*, превышающие по своей величине гравитационные и электромагнитные\*. Установлено, что на расстояниях, больших чем  $2 \cdot 10^{-13}$  см, они практически не проявляются, в интервале  $(1 \div 2) \cdot 10^{-13}$  см эти силы являются силами притяжения, а на расстояниях, меньших  $10^{-13}$  см они становятся силами отталкивания. Поэтому ядра «несжимаемы» и обладают огромной плотностью  $\sim 4,1 \cdot 10^{11}$  кг/см<sup>3</sup>. Также установлено, что ядерные силы действуют одинаково между любыми нуклонами ( $p-p$ ,  $n-n$ ,  $p-n$ ).

Природа ядерных сил весьма своеобразна. По теории, разработанной в 1935 г. японским физиком Х. Юкавой (1907—1981), нуклоны связаны в ядре благодаря тому, что испытывают непрерывное превращение друг в друга с испусканием и поглощением особых элементарных частиц —  $\pi$ -мезонов (пионов). Существуют три вида пионов ( $\pi^+$ ,  $\pi^0$ ,  $\pi^-$ ). Масса нейтрального ( $\pi^0$ ) мезона составляет  $263m_e$ , а заряженные пионы имеют массу, равную  $273$  массам электрона. Процесс взаимных превращений нуклонов можно представить следующими соотношениями:  $p \leftrightarrow n + \pi^+$ ;  $n \leftrightarrow p + \pi^-$ ;  $n \leftrightarrow n + \pi^0$ ;  $p \leftrightarrow p + \pi^0$ , а взаимодействие между нуклонами может происходить, например, по такой схеме:  $p + n \leftrightarrow n + \pi^+ + n \leftrightarrow n + p$ . Мезоны, которые испускаются и поглощаются нуклонами в ядре, не могут быть обнаружены из-за чрезвычайно малого времени их существования, поэтому

\* Взаимодействие нуклонов между собой получило название *сильного взаимодействия*.

они называются виртуальными. Виртуальный пион может стать реальным, если нуклону сообщить энергию, которая эквивалентна массе  $\pi$ -мезона ( $E = m_{\pi}c^2$ ).

**В классической физике нет аналога ядерных сил.** Некоторой весьма грубой моделью этого взаимодействия может служить пример очень быстрого перебрасывания мяча двумя предельно близко стоящими людьми. В среднем оба человека какое-то время держат мяч одновременно, и таким образом оказываются связанными друг с другом.

### 7.1.3. Энергия связи нуклонов в ядре

**Энергией связи** называется работа, которую нужно совершить для того, чтобы разложить ядро на отдельные составляющие его нуклоны. Чем выше энергия связи, тем устойчивее ядро. Энергия связи нуклона в ядре настолько велика, что порождает так называемый **дефект масс**: масса ядра всегда меньше суммы масс образующих его нуклонов. Для примера рассмотрим ядро гелия, состоящее из двух нейтронов и двух протонов. Точные измерения показывают, что  $m_p = 1,00758$  а. е. м., а  $m_n = 1,00893$  а. е. м. Сумма масс двух протонов и двух нейтронов составляет 4,03302 а. е. м. Масса же ядра гелия равна 4,00280 а. е. м. Дефект масс составляет  $\Delta m = 0,03022$  а. е. м. Это означает, что при образовании (синтезе) ядра гелия выделяется энергия ( $\Delta E$ ), эквивалентная 0,03022 а. е. м. ( $\Delta E = \Delta mc^2$ ). Следовательно, полная энергия ядра меньше, чем суммарная энергия невзаимодействующих нуклонов. Разница в этих энергиях и составляет энергию связи.

В общем случае энергию связи можно выразить так:

$$\Delta E = [(M_p + M_n) - M_{\text{я}}]c^2,$$

где  $M_p$ ,  $M_n$  и  $M_{\text{я}}$  — соответственно суммарная масса протонов, нейтронов, образующих ядро, и ядра как целого. Обычно ядро характеризуют энергией связи, приходящейся на один нуклон ( $\frac{\Delta E}{A}$ ), называемой удельной энергией связи. На рис. 7.1 представлена зависимость удельной энергии связи от массового числа ядер. Видно, что наиболее прочными являются ядра элементов, находящихся в середине таблицы Менделеева, а очень легкие и очень тяжелые ядра менее стабильны.

Кроме общей тенденции, отраженной на рис. 7.1, обнаружено также, что особой устойчивостью обладают ядра, у которых число протонов или нейтронов, или протонов и нейтронов вместе равно 2, 8, 20, 28, 50, 82 и 126. Эти числа получили название магических. Магическим числом нуклонов обладают, например, ядра He, O, Pb и др. Существование магических чисел мож-

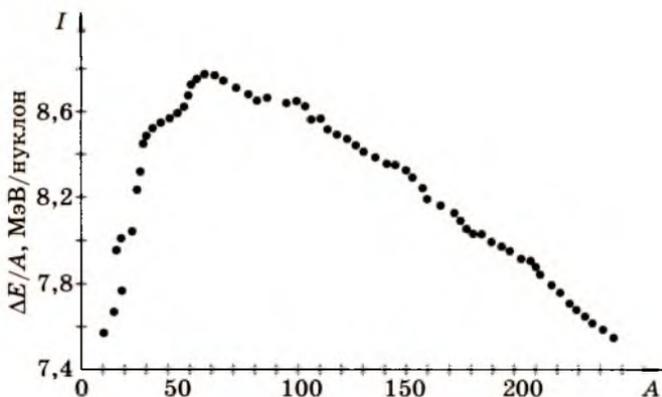


Рис. 7.1

но объяснить следующим образом. Нуклоны, как и электроны, обладают полуцелым спиновым квантовым числом ( $S = \pm 1/2$ ), и к ним применим принцип Паули. Следовательно, нуклоны в ядре должны занимать различные энергетические уровни. Подобно тому, как в атомах два электрона полностью заполняют  $K$ -слой, восемь электронов —  $L$ -слой и т. д., определенное число нуклонов заполняет соответствующие слои в ядре. Потенциальная яма для нейтронов в ядре схематически представлена на рис. 7.2.

Полную аналогию между строением атома и ядра провести нельзя, поскольку в ядре нет единого силового центра. В силу этого задача о расположении нуклонов в ядре очень усложняется. Стройной теории ядра в настоящее время не существует. Создано несколько приближенных теорий, объясняющих те или иные свойства атомных ядер.

Дискретные энергетические состояния нуклонов, о которых сказано выше, рассматриваются в *оболочечной модели*. То обстоятельство, что ядерные силы имеют очень малый радиус действия, а удельные энергии связи у большинства ядер очень близки, учитывается в *капельной модели* ядра, по которой нуклоны в ядре уподобляются молекулам в капле жидкости. При помощи капельной модели можно приблизительно вычислить энергию связи в различных ядрах и объяснить механизм деления ядер.



Рис. 7.2

## 7.2. РАДИОАКТИВНОСТЬ ЯДЕР

Каждый химический элемент имеет несколько изотопов, но не все они устойчивы. Некоторые изотопы нестабильны и самопроизвольно превращаются в изотопы других элементов с испусканием элементарных частиц или легких ядер. Это явление называется *радиоактивностью*.

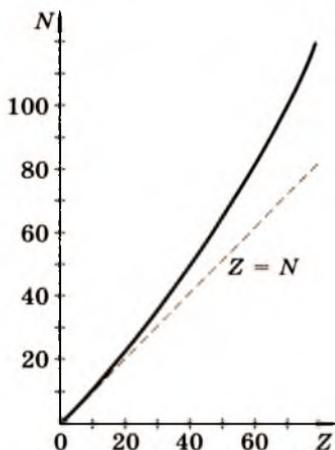


Рис. 7.3

Радиоактивный распад ядер был открыт в 1896 г. А. Беккерелем (1852—1908). Огромный вклад в решение проблемы радиоактивности внесли Э. Резерфорд (1871—1937), П. Кюри (1859—1906) и М. Кюри-Склодовская (1867—1934).

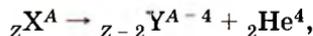
Радиоактивность обусловлена тем, что ядерные силы обладают очень коротким радиусом действия. Они связывают друг с другом только ближайшие нуклоны, поэтому с ростом числа нуклонов их связь ослабевает и ядра становятся радиоактивными. На рис. 7.3 представлена нейтронно-протонная диаграмма стабильных изотопов. Видно, что в легких устойчивых ядрах число протонов и нейтронов практически одинаково, тогда как стабильные изотопы тяжелых элементов содержат большее число нейтронов. Самым тяжелым из стабильных элементов является свинец.

Видно, что в легких устойчивых ядрах число протонов и нейтронов практически одинаково, тогда как стабильные изотопы тяжелых элементов содержат большее число нейтронов. Самым тяжелым из стабильных элементов является свинец.

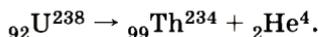
### 7.2.1. Виды радиоактивности

При своем распаде ядра могут испускать радиоактивное излучение трех видов:  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -лучи. В соответствии с этим рассматривают  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -распад.

При  $\alpha$ -распаде радиоактивное ядро испускает  $\alpha$ -частицу, которая представляет собой ядро изотопа гелия  ${}_2\text{He}^4$ . Схема  $\alpha$ -распада такова:



т. е. образуется ядро нового элемента, порядковый номер которого на две единицы, а массовое число на четыре единицы меньше исходного. Примером  $\alpha$ -распада может служить распад  ${}_{92}\text{U}^{238}$ :



**$\alpha$ -Распад** характеризуется следующей особенностью. Вылетающие  $\alpha$ -частицы обладают дискретной энергией, которая зна-

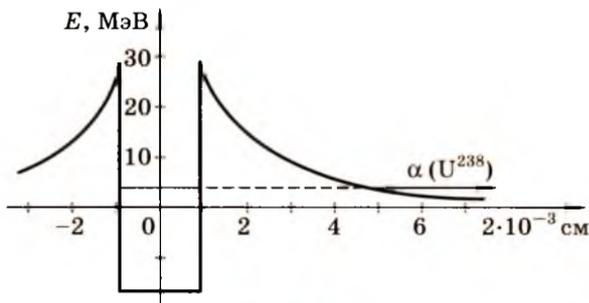


Рис. 7.4

чительно меньше, чем потенциальный барьер для этих частиц в ядре. Выход  $\alpha$ -частиц осуществляется за счет туннельного эффекта, что графически представлено на рис. 7.4.

**$\beta$ -Распад** сопровождается испусканием электронов ( $\beta$ -лучей), которые имеют при этом огромные скорости, близкие к скорости света. Образующийся при  $\beta$ -распаде изотоп сохраняет массовое число исходного элемента, но в таблице Менделеева сдвигается на одну клетку правее. При  $\beta$ -распаде энергия, содержащаяся в конечных ядрах, меньше энергии, содержащейся в исходных ядрах на определенную величину  $E_0$ . Естественно ожидать, что эту энергию и уносят  $\beta$ -частицы. Тогда из закона сохранения энергии следует, что все электроны в данном случае должны иметь энергию  $E_0$ . Этот ожидаемый результат представлен на рис. 7.5, а. На самом же деле большинство электронов имеет меньшую энергию (рис. 7.5, б). Поначалу даже высказывались идеи, что при  $\beta$ -распаде нарушается закон сохранения энергии. Однако впоследствии было установлено, что при этом ядерном превращении помимо  $\beta$ -частицы вылетает еще одна элементарная частица — антинейтрино ( $\bar{\nu}$ ). Эта частица не имеет электрического заряда, обладает колоссальной проникающей способностью и чрезвычайно слабо взаимодействует с другими частицами, поэтому долгое время ее не удавалось обнаружить экспериментально. В итоге схема радиоактивного  $\beta$ -распада такова:

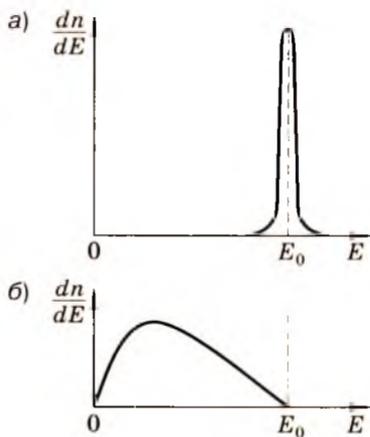


Рис. 7.5

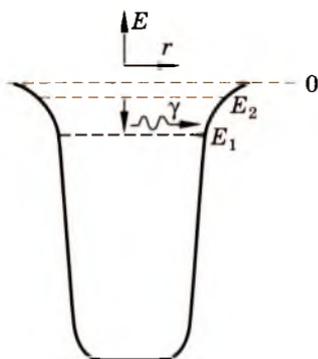


Рис. 7.6

$\gamma$ -квант (см. рис. 7.6). Этот процесс в некотором смысле аналогичен излучению света возбужденными атомами. Энергия  $\gamma$ -квантов в миллионы раз превышает энергию квантов света, поскольку энергия связи нуклонов в ядре примерно в  $10^6$  раз выше энергии связи электрона в атоме.

Установлено, что все существующие в природе радиоактивные элементы являются продуктами распада четырех исходных элементов:  ${}_{92}\text{U}^{238}$ ,  ${}_{92}\text{U}^{235}$ ,  ${}_{92}\text{Np}^{237}$  и  ${}_{90}\text{Th}^{234}$ . Процессы их радиоактивного распада заканчиваются соответственно образованием  ${}_{82}\text{Pb}^{206}$ ,  ${}_{82}\text{Pb}^{207}$ ,  ${}_{83}\text{Bi}^{209}$  и  ${}_{82}\text{Pb}^{208}$ . На рис. 7.7 для примера приведено радиоактивное семейство  ${}_{92}\text{U}^{238}$ .

Помимо естественных радиоактивных элементов, принадлежащих тому или иному радиоактивному ряду, можно искусст-

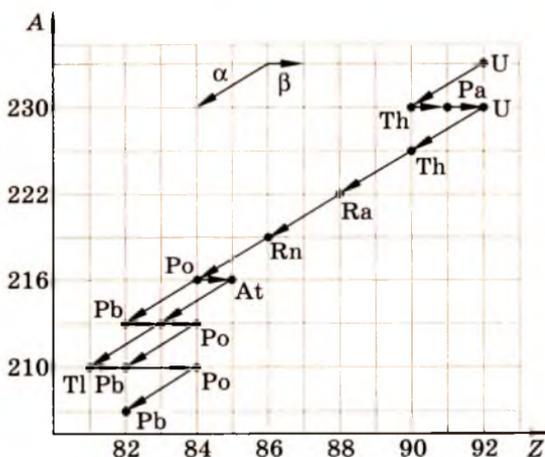


Рис. 7.7

венным путем получить радиоактивные изотопы стабильных элементов. Например, при облучении  ${}_{13}\text{Al}^{27}$   $\alpha$ -частицами получается радиоактивный фосфор ( ${}_{15}\text{P}^{30}$ ), аналогично из  ${}_{12}\text{Mg}^{22}$  можно получить радиоактивный кремний и т. п.

### 7.2.2. Основные законы радиоактивного распада

Распад естественных и искусственных радиоактивных элементов осуществляется по одному закону. Опыт показывает, что количество радиоактивных атомов  $N(t)$  убывает со временем экспоненциально:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t},$$

где  $\lambda$  — постоянная распада, характерная для каждого вещества. Она численно равна обратной величине времени, за которое число радиоактивных атомов уменьшится в  $e$  раз. На практике чаще пользуются не постоянной распада, а *периодом полураспада*  $T$ , т. е. временем, в течение которого распадется половина первоначального числа атомов. Период полураспада связан с постоянной распада соотношением  $T = \frac{0,693}{\lambda}$ , и таким образом закон радиоактивного распада можно записать как

$$N(t) = N_0 e^{-0,693 \frac{t}{T}}.$$

На рис. 7.8 представлен соответствующий график для конкретного значения  $T$ . Значения  $T$  для различных изотопов лежат в очень широких пределах: от  $10^{-16}$  с до миллиардов лет.

На законе радиоактивного распада основан способ определения возраста земных пород, остатков растений, организмов и т. п. Установлено, что в природе существует радиоактивный изотоп углерода  ${}_{6}\text{C}^{14}$  с  $T = 5600$  лет. Благодаря фотосинтезу и круговороту веществ в природе концентрация  ${}_{6}\text{C}^{14}$  во всех точ-

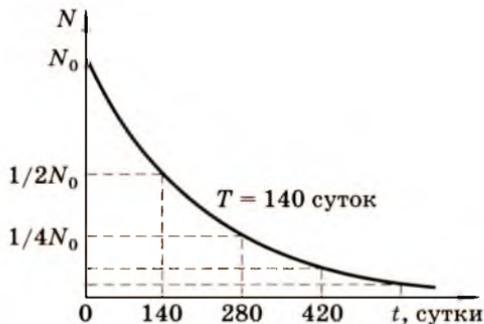


Рис. 7.8

как земного шара и во всех организмах практически одинакова. В момент гибели организма процесс усвоения  ${}_6\text{C}^{14}$  прекращается и его количество начинает убывать по закону (7.8). Если измерить концентрацию изотопа  ${}_6\text{C}^{14}$  в остатках древнего организма, то в соответствии с (7.8) можно определить время его гибели

$$t = \frac{T}{0,693} \ln \frac{N_0}{N(t)}.$$

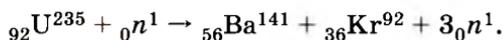
Возраст геологических пород можно определять по содержанию  ${}_{92}\text{U}^{238}$  и т. д.

## 7.3. ДЕЛЕНИЕ И СИНТЕЗ ЯДЕР

Огромный интерес, проявляемый к ядерной физике, связан прежде всего с тем, что атомное ядро является поистине неисчерпаемым источником энергии, в миллионы раз более эффективным, нежели другие ранее известные источники. Внутриядерная энергия выделяется как при делении, так и при синтезе ядер.

### 7.3.1. Деление ядер. Цепная реакция

Деление ядер урана было обнаружено в 1939 г. О. Ганом и Ф. Штрассманом и сразу же объяснено О. Фришем и Л. Мейтнер. Оно заключается в том, что при бомбардировке ядер  ${}_{92}\text{U}^{235}$  нейтронами образуются ядра двух элементов, стоящих в средней части таблицы Менделеева (чаще всего Ba и Kr), а также два или три нейтрона на каждое распавшееся ядро. Реакцию деления ядра урана  ${}_{92}\text{U}^{235}$  можно записать, например, так:



Как следует из рис. 7.1, энергия связи нуклонов во вновь образованных ядрах примерно на миллион элеткронвольт выше, чем у исходного ядра. Это означает, что реакция деления урана сопровождается выделением огромной энергии. Легко подсчитать, что только для одного атома  ${}_{92}\text{U}^{235}$  она составляет  $\sim 2 \cdot 10^8$  эВ. Для сравнения отметим, что при  $\alpha$ -распаде выделяется  $\sim 10^7$  эВ, а при химических реакциях — всего лишь несколько эВ на атом. Энергия, выделяющаяся при делении, уносится  $\gamma$ -квантами, а также новыми ядрами и нейтронами, которые приобретают огромные скорости.

Практический интерес представляет случай самоподдерживающейся реакции деления. Такая реакция действительно возможна, поскольку каждый нейтрон, выделившийся при делении одного ядра урана в принципе может вызвать деление дру-

гого ядра и т. д. Число актов деления возрастает лавинообразно — возникает *цепная реакция*. Схематически этот процесс представлен на рис. 7.9. Цепная реакция может быть управляемой и неуправляемой. Неуправляемая реакция осуществляется при взрыве атомной бомбы. Поскольку многие нейтроны покидают делящееся вещество прежде,

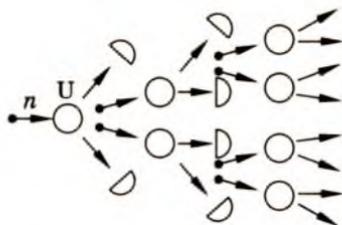
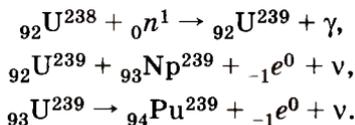


Рис. 7.9

чем встретятся с ядрами урана, для получения атомного взрыва нужно иметь достаточно большое количество делящегося вещества (достичь *критической массы*) с тем, чтобы максимально возможное число нейтронов проваимодействовало с ядрами. Цепную реакцию можно сделать управляемой, если на пути нейтронов поместить поглотитель (кадмий или бор). Погружая или вынимая из делящегося вещества поглотитель, можно регулировать размножение нейтронов и тем самым управлять скоростью цепной реакции. Управляемые цепные реакции осуществляются в ядерных реакторах, являющихся основной частью энергетических атомных установок (атомных электростанций, двигателей атомных подводных лодок и др.).

Наиболее благоприятно деление ядер  ${}_{92}\text{U}^{235}$  происходит под действием медленных нейтронов. Природный уран состоит в основном из  ${}_{92}\text{U}^{238}$  и содержит лишь 0,7% изотопа  ${}_{92}\text{U}^{235}$ . В уране-238 медленные нейтроны не вызывают цепной реакции, а приводят к следующим превращениям:

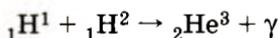


Конечный продукт этих превращений — изотоп плутония  ${}_{94}\text{Pu}^{239}$  имеет период полураспада 24100 лет, т. е. достаточно стабилен. Облучение  ${}_{92}\text{Pu}^{239}$ , как и  ${}_{92}\text{U}^{235}$ , медленными нейтронами вызывает цепную реакцию, т. е. плутоний также является хорошим ядерным топливом. В большинстве ядерных реакторов используется природный  $\text{U}^{238}$ , обогащенный до 5%  $\text{U}^{235}$ , поэтому каждый такой реактор является попутно накопителем  $\text{Pu}^{239}$ .

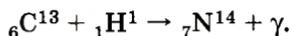
Впервые ядерные реакции для получения промышленной электроэнергии были использованы в СССР. Огромная роль в развитии ядерной энергетики принадлежит нашему замечательному физику И. В. Курчатову (1903—1960).

### 7.3.2. Термоядерный синтез

Термоядерный синтез заключается в образовании тяжелых ядер путем слияния ядер легких элементов. Примером может служить реакция образования гелия-3

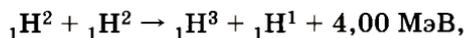
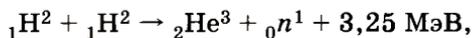


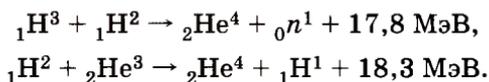
или азота-14



Термоядерный синтез может происходить лишь при сближении ядер исходных элементов на расстояние  $r \sim 2 \cdot 10^{-13}$  см, на котором уже проявляются силы ядерного взаимодействия. На таком расстоянии потенциальная энергия кулоновского отталкивания ядер водорода ( $U = e^2/r$ ) составит  $\sim 7,2 \cdot 10^5$  эВ. Для преодоления такого потенциального барьера ядра должны обладать гигантской кинетической энергией  $\sim 3,6 \cdot 10^5$  эВ. Такой величине средней кинетической энергии теплового движения частиц соответствует температура  $\sim 10^9$  К!!! По современным оценкам даже внутри Солнца температура достигает лишь  $2 \cdot 10^7$  К. Однако из распределения Максвелла (см. рис. 3.9) следует, что некоторая часть частиц движется с гораздо большими скоростями, чем средняя. Поэтому в недрах Солнца и других звезд термоядерный синтез гелия из водорода достаточно легко осуществим. В земных условиях температура в несколько миллионов градусов Кельвина возникает лишь при взрыве атомной бомбы, поэтому в настоящее время термоядерный синтез осуществляется лишь в виде термоядерного взрыва, которому должен предшествовать взрыв атомной бомбы как детонатор последующей реакции синтеза.

Из рис. 7.1 следует, что различие в энергии связи между легкими и средними по массе ядрами гораздо больше, чем между средними и тяжелыми ядрами, поэтому при термоядерном синтезе выделяется энергии в десятки раз большая, чем при делении ядер урана, т. е. термоядерный синтез является еще более эффективным источником энергии. Весьма важная задача получения управляемой термоядерной реакции еще полностью не решена, хотя в этом направлении и достигнуты большие успехи. С решением данной проблемы откроется практически неисчерпаемый источник энергии, поскольку 1/5000 часть всех атомов водорода, содержащихся в обычной морской воде, является изотопом  ${}_1\text{H}^2$  — дейтерием, который может участвовать в следующих реакциях:





Если реализуются все эти реакции, т. е. трансформация четырех ядер дейтерия в два ядра гелия, то в сумме выделится около 43 миллионов электронвольт энергии.

## 7.4. ВЛИЯНИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ НА БИОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

### 7.4.1. Ионизирующая способность радиоактивного излучения

Выше было показано, что радиоактивное излучение не однородно по своему составу. Оно может содержать заряженные частицы ( $\alpha$ -,  $\beta$ -, протоны, ядра продуктов деления и др.), нейтральные частицы (нейтроны, нейтрино и др.) и кванты электромагнитного излучения очень высоких энергий ( $\gamma$ -кванты). Однако в основе биологического действия любого компонента радиоактивного излучения лежит элементарный акт взаимодействия частицы с атомом вещества, в результате которого происходит возбуждение электронной оболочки атома или его ионизация.

Ионизирующая способность зависит от заряда, массы и скорости частицы. Тяжелые заряженные частицы (ядра,  $\alpha$ -частицы) движутся сравнительно медленно\* и на своем пути производят наибольшую ионизацию вещества. Например, в воздухе  $\alpha$ -частица на расстоянии в 1 см порождает в среднем 30000 пар ионов. В силу этого  $\alpha$ -частицы быстро теряют свою энергию и в твердые тела могут проникать лишь на доли миллиметра.

Проникающая способность  $\beta$ -излучения выше и достигает при тех же условиях 10—20 мм. На одном сантиметре пробега в воздухе они образуют около 300 пар ионов.

Ионизирующая способность  $\gamma$ -квантов в 100—200 раз ниже, чем  $\beta$ -частиц, а их проникающая способность соответственно в 100—200 раз больше.

Также велика проникающая способность быстрых нейтронов, поскольку непосредственно с электронами они практически не взаимодействуют. Нейтроны взаимодействуют лишь с ядрами, вызывая ядерные реакции, в результате которых выделяются  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -частицы, которые и ионизируют вещество. Иными словами, нейтроны вызывают ионизацию атомов косвенным путем.

---

\* Скорость  $\alpha$ -частиц достигает примерно 20000 км/с,  $\beta$ -частиц — до 200000 км/с,  $\gamma$ -кванты распространяются со скоростью света — 300000 км/с.

## 7.4.2. Единицы дозы облучения

**Дозой облучения** называется количество энергии, полученное веществом в результате прохождения через него радиоактивного излучения.

Для оценки биологического воздействия радиоактивного излучения используют единицу дозы **1 рад** — дозу, при которой в одном грамме биологической ткани при облучении ее любым видом излучения выделяется 100 эрг энергии.

В физике для измерения дозы используют также **рентген**. Одним рентгеном называется такая доза рентгеновского или  $\gamma$ -излучения, при которой в 1 см<sup>3</sup> сухого воздуха при 0 °С и нормальном давлении образуются ионы, имеющие суммарный заряд каждого знака в 1 СГСЕ ед. заряда. Это соответствует выделению энергии ~86 эрг.

Несмотря на то, что при одинаковой дозе облучения количество энергии, поглощенное тканью, не зависит от вида радиоактивного излучения, различные его компоненты оказывают различное биологическое воздействие. Поэтому для оценки поражающего действия излучения на биологическую систему необходимо дозу в радах ( $D$ ) умножить на соответствующий коэффициент, называемый **относительной биологической эффективностью (ОБЭ)**:

$$D_6 = D \cdot \text{ОБЭ}.$$

В таблице приведены значения ОБЭ для различных частиц. Биологическая доза  $D_6$  измеряется в **бэрах** (бэр — аббревиатура слов «биологический эквивалент рада»). Пусть, например, два организма получили дозу в 10 рад, причем первый был облучен  $\gamma$ -квантами, а второй — быстрыми нейтронами. Легко подсчитать, что первый получил 10 бэр, а второй — не менее 100 бэр.

Виды излучений	ОБЭ
$\alpha$ -частицы	10—20
Быстрые нейтроны	10
Медленные нейтроны	4—5
$\beta$ -частицы	1
$\gamma$ -кванты	1

Биологическое действие радиоактивного излучения зависит не только от дозы, но и от быстроты, с которой это излучение поглощалось. Для учета этого обстоятельства вводится понятие

**мощности дозы**  $P = \Delta D / \Delta t$ , которая численно равна дозе, полученной в единицу времени. При постоянной мощности дозы или при малом времени облучения  $D = Pt$ . Например, средняя мощность дозы радиоактивного облучения от естественных источников (космическое излучение, радиоактивные горные породы и т. п.) составляет 1 рад/год. Следовательно, за 70 лет жизни человек получает около 70 рад.

### 7.4.3. Действие радиоактивного излучения на клетку

Легко убедиться, что первичные процессы ионизации не вызывают значительных нарушений в тканях. В самом деле, даже при очень большой дозе облучения в организме разрушается менее одной миллионной доли всех клеток, т. е. примерно столько же, сколько их разрушается при царапине. Губительное действие облучения обусловлено уже вторичными процессами, при которых происходит разрыв связей внутри сложных органических молекул.

Коротко коснемся некоторых вопросов строения клетки. В общих чертах, клетка (рис. 7.10) состоит из оболочки (мембраны) и заключенной в ней протоплазмы, в которой находится множество органелл (1 — плазматическая мембрана; 2, 3 — рибосомы; 4 — ядро; 5 — ядрышко; 6 — хромосомы; 7 — митохондрия). Важнейшее место среди них занимает ядро. При повреждении ядра клетка обычно погибает. В ядре имеются хро-

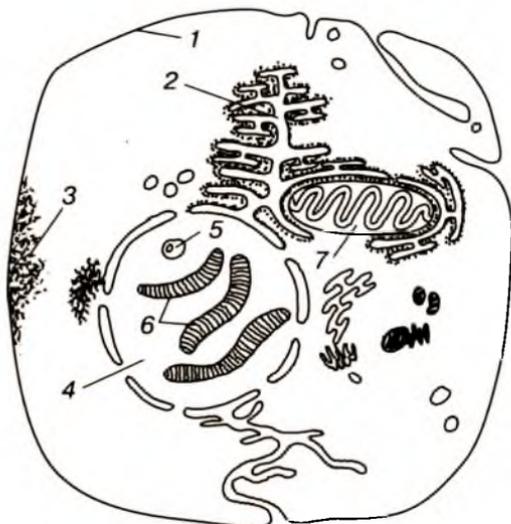


Рис. 7.10

мосомы — тельца, парные во всех клетках, кроме зародышевых. Хромосомы содержат в основном дезоксирибонуклеиновую кислоту (ДНК) и рибонуклеиновую кислоту (РНК). В молекулах ДНК включен код, определяющий структуру белков, синтезируемых в клетках, т. е. в конечном счете — всю наследственность. Ионизирующее излучение играет тройную роль в разрушении клетки.

Во-первых, частицы высоких энергий способны вызвать непосредственное разрушение молекул ДНК и РНК, т. е. аппарата наследственности, регулирующего все процессы, протекающие в клетке. В итоге это вызывает ее гибель. Показательно, что при облучении ядра дозой в сотни бэр клетка погибает, но если защитить ядро от облучения, то клетка остается жить и при дозе в десятки тысяч бэр.

Во-вторых, ионизация молекул воды, содержащихся в клетке, порождает активные радикалы  $\text{HO}_2$  и перекись водорода  $\text{H}_2\text{O}_2$ , которые разрушают молекулы белка, ДНК и РНК. Кроме того, излучение может ухудшить проницаемость плазматической мембраны, а значит, и энергообмен.

В-третьих, даже очень малые дозы облучения оказывают генетическое действие. Небольшие мутации в наследственном аппарате могут и не вызывать гибели данной клетки, но они передаются дочерним клеткам и проявляются в последующих поколениях. При этом вредные мутации накапливаются из поколения в поколение. Например, подсчитано, что если средняя доза, которую получает каждый человек от естественного радиоактивного фона возрастет всего лишь на 1 бэр, то в следующем поколении на Земле возможно рождение 10 миллионов детей с наследственными уродствами. В связи с этим понятно, почему человечество борется за прекращение любых ядерных испытаний, которые в той или иной степени увеличивают радиоактивный фон.

Проследим в общих чертах характер поражения живых клеток, вызванного различными дозами облучения.

а) При облучении дозой в несколько десятков тысяч бэр организм погибает через несколько минут, так как разрушается очень большое число молекул, составляющих ткани.

б) Доза от 3000 до 10000 бэр вызывает смерть через несколько часов из-за прекращения обмена веществ.

в) При дозе в 3000 бэр прекращается нормальное обновление клеток, отчего организм тоже погибает.

г) При меньших дозах возникает лучевая болезнь различной степени тяжести. Смертельной дозой принято считать такую, при которой через 30 дней погибает более 50% облученных организмов. Для человека эта величина составляет 500 бэр.

Как было показано выше, человек в течение жизни получает от естественных источников около 7 бэр. Международная комиссия по радиологической защите установила допустимую дозу для людей, работающих с излучением 5 бэр в год. Для остального населения в России принята допустимая доза в 1% от профессиональной дозы.

В заключение отметим, что не все ткани одинаково восприимчивы к радиоактивному излучению. Чем быстрее делятся и обновляются клетки ткани (например, лейкоциты), тем сильнее они подвержены действию излучения и, наоборот, чем медленнее обновляются клетки (например, нервные ткани), тем большая доза нужна для их разрушения.

#### **7.4.4. Использование радиоактивных излучений в биологии**

Не следует полагать, что радиоактивное излучение играет в биологических процессах только отрицательную роль. Общеизвестны, например, успешные попытки использования радиоактивных излучений для борьбы с раковыми заболеваниями. Естественные мутации, необходимые для развития видов, во многом обусловлены радиоактивным фоном и т. п.

Широкие возможности открылись перед биологами с разработкой метода *меченых атомов*. Он заключается в том, что к нерадиоактивному веществу добавляют небольшое количество его радиоактивного изотопа, смесь вводят внутрь организма, после чего с помощью индикаторов можно проследить за распространением и концентрацией данного вещества. Путем введения в кровеносную систему меченых атомов можно определить скорость течения крови в различных частях тела. Изотопы  $C^{136}$  и  $Na^{22}$  используются для изучения передвижения почвенных вод и выяснения солевого режима почвы. Метод меченых атомов очень эффективен при изучении приемов улучшения питания сельскохозяйственных растений и животных и т. д.

Еще в конце XIX в. было открыто явление радиостимуляции роста растений. Например, обнаружили, что при облучении семян ржи не только ускоряется их прорастание, но и увеличивается густота колосьев на делянке, число, вес и размеры зерен в колосе. Аналогичные явления наблюдаются в зоне чернобыльской аварии.

В целом же в сельском хозяйстве можно выделить четыре направления применения радиоактивных излучений.

1. Облучение сравнительно небольшими дозами (200—1000 рад) семян, ростков, взрослых растений, плодов, ягод и т. п. увеличивает всхожесть, ускоряет прорастание, повышает урожайность и качество продукции, например, увеличивается са-

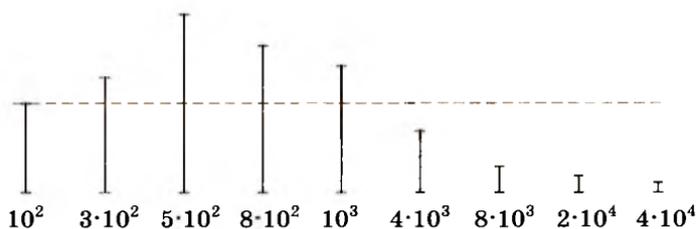


Рис. 7.11

харистость дынь, арбузов, сахарной свеклы, увеличивается накопление белков, жиров и клетчатки в кукурузе, увеличивается содержание витаминов в капусте, картофеле, моркови и т. д.

2. Более высокие дозы облучения задерживают рост и развитие растений. На рис. 7.11 представлен рост кукурузы при воздействии различных доз  $\gamma$ -излучения (в бэрах). Штриховой линией отмечен рост контрольных растений.

Это явление используется также для увеличения сроков хранения овощей и другой сельскохозяйственной продукции.

3. Еще большие дозы радиации применяются для стимуляции мутагенной активности с целью отбора наиболее ценных мутантов.

4. Дозы, смертельные для живых организмов, используются для борьбы с сельскохозяйственными вредителями и другими вредными насекомыми и микробами.

Механизм радиостимуляции сводится к тому, что излучение вызывает процессы, выводящие семя из состояния покоя, мобилизующие запасы питательных веществ, усиливающие окислительные реакции и т. д.

Использование достижений физики в биологии, в частности в сельском хозяйстве, приводит к значительному прогрессу в этой области.

## 7.5. НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦАХ

Иерархическая пирамида строения вещества выглядит так. Все вещества состоят из молекул; молекулы — из атомов; атомы построены из электронов и ядер; ядра — из протонов и нейтронов. Но электроны, протоны и нейтроны уже нельзя представить «состоящими из» каких-либо других отдельно существующих частиц, поэтому их называют *элементарными частицами*\*. Однако термин «элементарная частица» указывает только

\* Существует так называемая теория кварков, по которой все адроны представляются состоящими из неких пра-частиц (кварков). Однако экспериментально эти частицы в свободном состоянии не наблюдаются.

на то, что по современным представлениям эти частицы не обладают какой-либо внутренней структурой, но совсем не означает, что свойства таких частиц просты (элементарны). Наоборот, ниже мы увидим, что элементарные частицы обладают весьма сложными и многообразными свойствами, претерпевают различные превращения.

В настоящее время открыто свыше 200 элементарных частиц. Некоторые из них (электрон, протон, нейтрон, фотон, нейтрино) устойчивы и составляют большую часть материального мира. Другие же встречаются лишь в космическом излучении или получены искусственным путем в мощных ускорителях и имеют очень малое время жизни.

В настоящем пособии не представляется возможным изложить сколь-нибудь полно современные представления об элементарных частицах, тем более что многие из этих представлений только складываются и свойства элементарных частиц до конца еще не изучены.

### 7.5.1. Классификация элементарных частиц

В физике элементарных частиц сейчас сложилось примерно такое же положение, какое было в химии к моменту открытия Д. И. Менделеевым периодической системы элементов: физики классифицируют элементарные частицы по тем или иным признакам, отыскивают общие свойства, позволяющие объединить их в более или менее крупные группы. Одна из возможных классификаций в ее самом общем виде приведена в таблице.

АДРОНЫ (частицы, вступающие в сильное взаимодействие с участием $\pi$ -мезонов)	Барионы	Гипероны ( $\Lambda$ , $\Sigma$ , $\Xi$ , $\Omega$ )
		Нуклоны ( $n$ , $p$ )
	Мезоны	$K$ -мезоны
		$\pi$ -мезоны
ЛЕПТОНЫ (частицы, вступающие в слабое взаимодействие)	Мюонное семейство	$\mu$ -мезоны
		мезонное нейтрино ( $\nu_\mu$ )
	Электронное семейство	электроны ( $e$ )
		электронное нейтрино ( $\nu_e$ )
ФОТОН	Квант электромагнитного излучения	

При классификации учитывают такие свойства частиц, как электрический заряд, масса покоя, спин и др. Элементарные частицы могут иметь положительный или отрицательный электрический заряд, равный по величине заряду электрона (элементарный заряд), либо вовсе не иметь заряда. Например, заряд протона (+1), заряд нейтрона (0), заряд  $\pi$ -мезонов ( $\pm 1$ ) и (0) и т. д. Элементарных частиц с зарядом, превышающим единицу, не найдено.

По величине массы покоя элементарные частицы можно классифицировать так: 1) фотон (масса покоя равна нулю), 2) лептоны (масса покоя составляет от одной до сотен электронных масс), 3) мезоны (масса покоя имеет промежуточное значение между массами лептонов и нуклонов), 4) барионы (масса покоя равна или превышает массу покоя нуклонов).

Спин — собственный механический момент импульса элементарной частицы — в ядерной физике измеряется в единицах  $\hbar$ . Он может быть равен 0 (мезоны),  $1/2\hbar$  (электрон, нуклоны, гипероны),  $1\hbar$  (фотон). Кроме того, предполагают, что спин  $\Omega$ -гиперона равен  $3/2$ .

### 7.5.2. Античастицы

П. Дирак в 1928—1931 гг. теоретически предсказал существование *античастиц*. Они должны иметь массу, тождественную массе соответствующих частиц и противоположные другие параметры (заряд, спин и т. д.). В 1933 г. К. Андерсон открыл первую античастицу — антиэлектрон, которую назвали *позитроном*. В настоящее время почти у каждой частицы обнаружена античастица. Более того, получены даже ядра атомов антиводорода и антигелия. Это наводит на мысль, что во Вселенной возможно существование антивещества, скажем в виде антигалактик. Установить принадлежность далеких галактик к веществу или антивеществу очень сложно, так как квант электромагнитного излучения (фотон) — основной источник информации о них — тождественен антифотону. Встреча вещества с антивеществом явилась бы катастрофой. Дело в том, что при столкновении частицы и античастицы происходит *аннигиляция* — обе частицы перестают существовать как таковые и превращаются в другие частицы, главным образом в фотоны:

$$e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma,$$

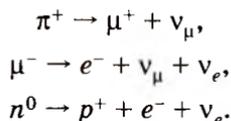
$$p^+ + p^- \rightarrow 2\gamma.$$

По закону сохранения энергии энергия двух образующихся фотонов равна энергии покоя исходных частиц:  $2\hbar\omega = 2m_0c^2$ , откуда ясно, что аннигиляция сопровождается выделением колос-

сальнейшей энергии. Эффективность такой реакции примерно в  $10^3$  раз выше, чем термоядерного синтеза.

Имеет место и обратный процесс: при взаимодействии фотона с веществом может образоваться пара частица — античастица. Естественно, энергия фотона при этом должна быть не меньше энергии покоя двух образующихся частиц:  $h\omega \geq 2m_0c^2$ .

Помимо рассмотренных выше реакций возможны и многие другие превращения элементарных частиц. Например:



В заключение следует сказать, что физика элементарных частиц еще далека от завершения и в настоящее время многие ее разделы интенсивно развиваются.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И УПРАЖНЕНИЯ

1. Что меньше — масса ядра или масса частиц, входящих в его состав?

2. Можно ли говорить, что энергия связи характеризует не только ядра атомов, но и молекулы?

3. Почему не удастся осуществить ядерный синтез, скажем, бомбардировкой ядрами тяжелого водорода (дейтерия) куска льда, полученного при замораживании тяжелой воды?

4. Почему аварийный блок Чернобыльской атомной электростанции представляет угрозу до сих пор, хотя он уже бездействует многие годы?

5. В чем состоит главная опасность радиоактивного излучения для человека, если известно, что энергия этого излучения, непосредственно поглощаемая человеческим телом, много меньше, чем энергия, выделяемая при падении на него небольшой капли воды?

6. Почему при соединении (аннигиляции) электрона с позитроном энергии выделяется больше, чем при соединении электрона с протоном в атом водорода, ведь масса протона почти в 2000 раз больше, чем позитрона?

7. Какая доля первоначального числа ядер атомов радия будет распадаться через 3200 лет, если период полураспада составляет 1600 лет?

8. В агробиологических исследованиях методом меченых атомов часто используют изотоп фосфора  ${}_{15}^{32}\text{P}$  с периодом полураспада  $T = 14,3$  дня. Какая часть первоначального числа радиоактивных атомов останется через два месяца?

9. За  $\alpha$ -распадом  $U^{238}$  происходят два последовательных  $\beta$ -распада. Чему равны  $Z$  и  $A$  конечного продукта? Запишите реакции распада.

10. Ядро  ${}_{94}\text{Pu}^{244}$  испытывает  $\alpha$ -распад. Дочернее ядро испытывает два последовательных  $\beta$ -распада. Образовавшееся ядро бомбардируется нейтронами и поглощает 4 нейтрона. Чему равны величины  $Z$  и  $A$  конечного продукта? Напишите уравнения реакций.

11. При взрыве 18 кг вещества в водородной бомбе выделяется  $10^6$  ккал теплоты. На сколько граммов масса продуктов взрыва меньше массы исходного взрывчатого вещества?

12. При археологических раскопках был найден деревянный сосуд, в котором концентрация радиоактивного изотопа  ${}_{6}\text{C}^{14}$  составляет 80% средней концентрации, содержащейся в растениях. Сколько лет назад было срублено дерево?

13. Для увеличения сроков хранения картофеля его необходимо облучить дозой 2000 бэр. Какова физическая доза облучения в радах, если облучение производится: а)  $\alpha$ -лучами? б)  $\beta$ -лучами? в)  $\gamma$ -лучами? г) быстрыми нейтронами? д) тепловыми медленными нейтронами?

14. В биологических экспериментах посадка пшеницы облучалась ежедневно в течение часа  $\gamma$ -лучами с мощностью дозы 1 рад/час. Какую дозу получают растения за 5 месяцев?

15. Электрон аннигилирует с позитроном, в результате чего образуются два фотона равной энергии. Определите их частоту.

16. В результате аннигиляции протона и антипротона образуются три пиона равной энергии. Какова кинетическая энергия пионов?

## ОТВЕТЫ

### НА КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И УПРАЖНЕНИЯ

#### Глава 1

1. Да. Рост человека незначительно превышает 1 м. В логарифмическом масштабе это соответствует нулю ( $\lg 1 = 0$ ).

2. Время между двумя приливами, колебание маятника в часах, удары пульса у здорового человека. Да мало ли других, которые вы можете назвать сами.

3. Очевидно, можно пренебречь температурой воздуха, так как плотность атмосферы у поверхности Земли не очень сильно меняется с температурой, а сам воздух мало влияет на падение камня.

4. а) 0; б)  $c$ ; в)  $4cx^2$ ; г)  $\frac{1}{x+1}$ ; д)  $a \cos x - \frac{2B}{x^3}$ ; е)  $\frac{1}{2x}$ ;

ж)  $\frac{1}{\cos^2 x} - \frac{a}{2\sqrt{x}}$ .

5. а)  $\frac{x^3}{3} + C$ ; б)  $2\sqrt{x} + C$ ; в)  $\frac{5x^4}{4} + x^3 + x^2 - x + C$ ;

г)  $\ln \left| \operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{4} + \frac{x}{2} \right) \right| + C$ .

6. а) 18; б)  $3 \ln \frac{\beta}{\alpha}$ ; в)  $e - 1$ ; г) 0.

#### Глава 2

1. По крайней мере напрашивается еще одно — любовь. Однако при строгом анализе эмоциональных взаимодействий можно видеть, что в их основе лежит электромагнитное взаимодействие, ибо оно определяет, например, зрительный образ того или иного человека, отвечает за все химические и биологические процессы. Что касается экстрасенсов, прорицателей и т. п., то их воззрения выходят за рамки законов материального мира (им занимаются естественные науки), ибо не оперируют параметрами, которые можно как-либо измерить.

2. Да, энергия сохраняется, но помимо экологических проблем надо иметь в виду, что химическая энергия высоко концентрирована в химических связях исходного топлива (мазута,

угля, газа). При сжигании топлива она рассеивается в виде тепловой энергии больших объемов воды, воздуха, других объектов и не существует способа собрать ее снова для совершения полезной работы.

3. Средняя скорость спортсмена составляет 10,1 м/с.

4. Средняя скорость автомобиля на этом отрезке пути составила 60 км/час. Поскольку по крайней мере в момент начала движения его скорость была равна 0, то где-то на пути она обязательно превышала 60 км/час.

5. Ускорение можно определить и таким образом, однако в этом случае и скорость  $v$ , и расстояние  $X$  сложным образом зависят от времени, что сделает все формулы кинематики весьма неудобными для практического применения.

6. Человек проходит за один оборот путь, равный  $2\pi R = 31,4$  м. Значит среднее значение модуля скорости равно 3,14 м/с. Однако средняя скорость определяется как перемещение, деленное на время, и является величиной векторной. Перемещение за время одного полного оборота равно нулю. Поэтому и средняя скорость тоже равна нулю.

7. Аристотель не принимал в расчет ни инерцию, ни силы трения, которые возникают при движении тел. Автомобиль движется равномерно и прямолинейно только в том случае, когда равнодействующая всех действующих сил равна нулю. В данном случае движущая сила со стороны двигателя, которая направлена вперед, уравнивается силами трения, которые действуют на тело со стороны дороги и воздуха и направлены назад.

8. При приведении тела во вращательное движение важна не сила как таковая, а момент силы, который пропорционален радиусу-вектору точки приложения силы. Проверьте это утверждение на ближайшей двери.

9. Ветер дул бы на север, если бы Земля была неподвижна. Из-за вращения Земли возникает сила Кориолиса, которая будет отклонять движущийся воздух вправо (на восток). Поэтому ветер будет дуть на северо-восток. Посмотрите на этот рисунок, так образуются атмосферные вихри — циклоны.



10. Эксперименты по падению в вакууме разных тел с одной скоростью говорят о том, что инертная и гравитационная массы пропорциональны друг другу (можно выбрать систему единиц, в которой они будут просто равны друг другу). Если же допустить, что  $m_{гр} \sim m_{ин}^2$  и воспользоваться законом всемирного тяготения и вторым законом Ньютона, то можно убедиться, что в этом случае ускорение

тяжелого тела будет в два раза больше, чем ускорение легкого тела и оно быстрее достигло бы Земли.

11. Воспользуйтесь законом всемирного тяготения и убедитесь, что ускорение свободного падения в этом случае было бы примерно в два раза меньше.

12. По правилу правого винта легко определить, что она направлена от зрителя за циферблат часов.

13. При вращательном движении имеет значение не масса тела, как таковая, а момент инерции. У полого цилиндра момент больше, поэтому он будет скатываться медленнее.

14. Нарисуйте орбиты Земли и Луны и убедитесь, что пока Луна за 27 суток делает полный оборот, система Земля — Луна переместится по орбите вокруг Солнца на  $26^\circ$ . И Луне, чтобы попасть в положение новолуния, придется пройти по своей орбите те же  $26^\circ$ , на что понадобятся еще двое суток.

15. Скорость максимальна, когда подвешенное тело проходит точку равновесия и равна нулю в момент максимального отклонения от этой точки.

16. Да, импульс изменится. Хотя его абсолютная величина останется прежней, но знак изменится на противоположный.

17. По третьему закону Ньютона вес Земли также будет равен  $0,55 \text{ Н}$ . В этом можно убедиться и воспользовавшись законом всемирного тяготения.

18. Система «стул—человек» замкнута. Прилагая вращающий момент в одном направлении, вы вызываете вращающий момент, однако в другом направлении. В результате суммарный момент сил равен нулю.

19. Ответ на этот вопрос практически уже дан в предыдущем случае. Если бы винт был один, то его вращение заставило бы корпус вертолета вращаться в противоположном направлении.

20. Гимнаст, оторвавшийся от пола, становится замкнутой системой. «Группируясь», он уменьшает свой момент инерции, что по закону сохранения момента импульса приводит к возрастанию угловой скорости, так что за время прыжка его тело успевает сделать даже несколько поворотов вокруг оси вращения.

21. Энергия, как и деньги, полезна только в процессе обмена, когда она переходит от одного к другому. Аккумуляторная батарея может заводить двигатель только тогда, когда ток от нее пропускается через стартер, т. е. когда аккумуляторная батарея расходует энергию, а двигатель ее получает.

22. Сила трения всегда возникает лишь как противодействующая силе, приложенной к телу, а значит, является следствием движения тела и не может быть его причиной.

23. Конечно, нет. Пружина приобретает потенциальную энергию и может совершить эквивалентную работу, если ее отпустить.

24. При уменьшении радиуса орбиты скорость спутника возрастает.

25. Все зависит от системы координат. Если рассматривать это движение в системе координат, неподвижно связанной с Землей, то, конечно, Солнце движется вокруг Земли. Все инерциальные системы отсчета равноправны.

26. При условии что скорость движения объекта  $v$  много меньше скорости света  $c$  ( $v/c \ll 1$ ).

27. Большой объем воды в водонапорной башне создает постоянное давление в водопроводной системе. Если объем воды в баке мал или же вода подается непрерывно насосом, то давление в водопроводной системе будет постоянно «скакать». К чему это приведет — понимает каждый.

28.  $g = 1,6 \text{ м/с}^2$ .

29. Нет, так как ускорение характеризует быстроту изменения скорости.

30. Скорость нужно увеличить в  $\sqrt{3}$  раз.

31.  $I_3 = 9,67 \cdot 10^{37} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ;  $I_{II} = 8,8 \cdot 10^{34} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ .

32. Н/м.

33. 708 Н.

34.  $T = 2\pi \sqrt{\frac{(R_3 + h)^3}{\gamma M_3}} = 712 \text{ ч.}$

35. 0,25 м/с.

36.  $1,04\rho_0$ .

37. 6000 км/ч.

38. 390%.

39.  $v = \sqrt{\frac{3gh}{2}} = 0,19 \text{ м/с.}$

40.  $A = 75 \text{ Дж}$ ;  $\Delta E = 49 \text{ Дж.}$

41.  $E_{к0} = \frac{mgh}{0,3} = 0,33 \text{ Дж.}$

42.  $1,1 \cdot 10^{17} \text{ (кг/м}^4 \cdot \text{с).}$

### Глава 3

1. Да, наблюдается. Для получения более устойчивой картины надо проводить наблюдения при более низкой температуре.

2. На большой высоте содержание кислорода в единице объема воздуха ниже, чем внизу. Описанные явления представляют собой реакцию организма на недостаток кислорода.

3. Размер полости тоже будет увеличиваться с ростом температуры. Поскольку жидкость внутри трубки расширяется много больше, чем твердое тело, это обстоятельство мало влияет на показания термометра. Тем не менее для точности это учитывается при градуировке термометров.

4. О температуре поджариваемого ломтика хлеба можно судить по его цвету. Если вода замерзла, то ее температура ниже  $0^\circ\text{C}$ . О температуре молока в детском рожке обычно судят, брызгая его на кожу запястья руки. Да только ли это!

5. Молекулы водорода легче, но зато быстрее. В результате они передают стенкам тот же импульс.

6. Нет, не всегда. Например, если нагревать лед при  $0^\circ\text{C}$ , то он будет таять, но температура его будет оставаться равной  $0^\circ\text{C}$ . То же самое произойдет при нагревании воды при  $100^\circ\text{C}$ . Она будет кипеть, но температура будет оставаться прежней.

7. Теплоемкость воды выше теплоемкости большинства других жидкостей. Поэтому грелка с водой остывает медленнее.

8. Нет, нельзя. Потрогайте заднюю стенку холодильника и убедитесь, что при охлаждении внутренней части холодильника тепло отводится в специальный радиатор и там нагревает воздух. Так что работающий холодильник, наоборот, всегда нагревает воздух в комнате. А при открытой его дверце произойдет лишь перераспределение холодных и теплых воздушных потоков. В кондиционерах, которые используются для охлаждения комнаты, радиатор выносят наружу.

9. Кинетическая энергия молекул газа у поверхности Луны больше, чем потенциальная энергия их притяжения к Луне (существенно меньшая, чем на Земле). Иными словами, скорость молекулы газа оказывается выше второй космической скорости для Луны.

10. В замкнутом пространстве все направления равноправны и молекулы движутся хаотично. При открывании отверстия одно направление получает преимущество — молекулы, которые движутся в этом направлении, покидают замкнутый объем, т. е. появляется упорядоченное движение... Не так ли действуют политические лидеры, когда указывают направление общественного развития?!

11. Нет, нельзя, потому что они являются открытыми системами. При получении пищи из внешней среды их энтропия может уменьшиться, но при этом возрастает энтропия среды их обитания.

12.  $1,7 \cdot 10^5$  Па.

13.  $2,3 \cdot 10^{-3}$  кг/моль.

14.  $3,4 \cdot 10^5$  молекул.

15.  $T_2 = 4T_1 = 1200$  К;  $p_2 = 4p_1 = 4 \cdot 10^5$  Па.

16.  $E_k = \frac{3m}{2\mu} RT = 9,4$  кДж.

17.  $\frac{dN}{N} = 2,9 \cdot 10^{-3}$ .

18. При температуре холодильника 0 К. Однако такая температура недостижима.

$$19. \frac{\eta_a}{\eta_n} = 1,36.$$

$$20. \Delta S = \frac{Q}{T_2} - \frac{Q}{T_1} = -47 \text{ мДж/К.}$$

$$21. \eta = \frac{A}{A + Q} = 54\%.$$

22. Да, сможет, так как при этом температура изменится на 0,36 К.

23. Можно, если температура нагревателя достигнет 517 К.

24. 0,35 кг.

25.  $5,5 \cdot 10^{-2}$  Па.

## Глава 4

1. В начальный момент свободные электроны в шарике перейдут к его дальней поверхности, а положительные заряды останутся у ближней, поэтому он притянется к расческе. После этого отрицательный заряд с расчески частично перейдет на шарик и он станет тоже заряженным отрицательно, а следовательно, оттолкнется от расчески.

2. Если бы этот угол отличался от  $90^\circ$ , то силовые линии имели бы составляющую вдоль поверхности проводника, и заряды под действием этой составляющей электрической силы стали бы двигаться вдоль поверхности до тех пор, пока силовые линии не стали бы перпендикулярными ей.

3. Можно полагать, что емкость человека будет примерно такой, какую имеет шар, площадь поверхности которого равна площади поверхности тела человека, т. е. радиусом примерно 1 м.

4. Разница в том, что в случае с карманным фонариком электрические заряды проходят разность потенциалов 3 В, а в обычной лампочке — 220 В, т. е. теряют энергию, которая идет на нагревание нити в 73 раза больше.

5. Да, в однородном магнитном поле диполь неподвижен, но он может двигаться в неоднородном поле, когда эти силы не уравновешивают друг друга.

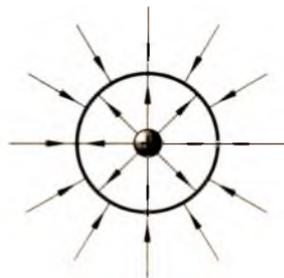
6. Плотность линий напряженности внутри сферы в 1,5 раза меньше, чем снаружи (см. рисунок).

7. В  $10^{38}$  раз.

8.  $1,6 \cdot 10^{-18}$  Дж.

$$9. \frac{E_k}{E_n} = \frac{1}{2}.$$

10. Сопротивление плитки меньше сопротивления лампочки.



11.  $H = 0$  при одинаковых направлениях токов;  $H = \frac{I}{\pi r} = 16 \text{ А/м}$ .

12. По величине сила в обоих случаях равна 25 мкН. В случае одинакового направления токов сила имеет характер притяжения, при противоположных направлениях — характер отталкивания.

13.  $A = 6,16 \text{ Дж}$ ;  $P = 3080 \text{ Вт}$ .

14. 3 кОм.

## Глава 5

1. Синусоидальные колебания возникают под действием силы, пропорциональной смещению:  $F = -kx$ . При малых смещениях это соотношение выполняется практически всегда. Поэтому синусоидальные волны так распространены в природе.

2. Длина волны определяется как  $\lambda = v/\nu$ . Для летучих мышей эта величина составляет  $\lambda = (3,43 \cdot 10^2)/10^5 = 3,4 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 3,4 \text{ мм}$ . Примерно таков размер насекомых, представляющих интерес для летучих мышей. Для дельфинов, соответственно, эта величина составляет  $\approx 1,5 \text{ см}$  (т. е. они могут обнаружить уже маленькую рыбку).

3. В первом случае фронт будет иметь форму окружности, во втором случае — сферическую.

4. Известно, что большие оркестры лучше слушать на достаточно большом удалении от них. Это говорит о том, что скорость распространения звука в воздухе не зависит от его частоты.

5. Рупор фокусирует звук в сравнительно узкий пучок и тем самым увеличивает плотность энергии в нужном направлении. Без этого энергия звуковой волны будет уходить и по другим направлениям.

6. Условия получения стоячей волны определяются соотношением между частотой, скоростью волны и длиной струны. От натяжения струны зависит скорость распространения волны, а следовательно, и частота. Это явление и лежит в основе настройки струнных музыкальных инструментов.

7. Никакой дополнительной энергии нет. Корпус гитары лишь позволяет струне излучать ту же энергию за более короткий промежуток времени. Поэтому в гитаре колебания струны затухают быстрее, чем у такой же струны, но натянутой, скажем, на обычную палку.

8. Частота колебаний струны определяется длиной волны и скоростью ее распространения. Изменяя натяжение струны, изменяют эту скорость, а следовательно, и частоту излучаемых колебаний.

9. Из формулы для интерференции от двух щелей легко видеть, что угол, под которым будет наблюдаться усиление синего света, будет меньше, чем для красного, поэтому синяя полоса будет несколько сдвинута по отношению к красной. Области усиления остальных цветов будет располагаться между этими двумя позициями. Таким образом, вся картина будет выглядеть как серия набегающих друг на друга радуг.

10. Для создания так называемой просветленной линзы на нее наносится тонкая прозрачная пленка, толщина которой подбирается так, чтобы между оптическими лучами, отраженными от внешней и внутренней поверхностей пленки, возникала разность фаз  $180^\circ$ . В этом случае для любого цвета отраженные световые пучки будут находиться в противофазе, и такая поверхность выглядит черной. Поскольку при этом на поверхности не возникает бликов, изображение, формируемое прошедшим световым потоком, будет более качественным. Между прочим, подобное явление можно наблюдать, создавая мыльную пленку на проволочной рамке. Пленка постепенно истончается и играет всеми цветами радуги, но перед тем как лопнуть, когда ее толщина становится достаточно малой, она приобретает черный цвет.

11. Поскольку длина звуковых волн много больше размера ячеек проволочной сетки, волны легко проходят через нее, почти не отражаясь. Бетон, будучи плохим проводником, мало поглощает и не очень сильно отражает электромагнитные волны. Поэтому в бетонных зданиях можно пользоваться радиоприемниками и радиотелефонами.

12. Да, это так. Кинетическая энергия имеет размерность массы, умноженной на квадрат скорости ( $mv^2$ ). Если разделить ее на скорость, то получим массу, умноженную на скорость ( $mv$ ), т. е. размерность импульса.

13. Как следует из этой главы, волны, длина которых  $\lambda$  больше размера препятствия  $d$ , огибают его, не создавая тени. Если же  $\lambda < d$ , то препятствие будет отбрасывать тень. По этой причине радиопередачи в УКВ диапазоне можно устойчиво слушать практически только на расстоянии «прямой видимости». На открытой ровной местности при технически достижимой высоте размещения передающей антенны это расстояние составляет несколько десятков километров.

14. Это не совсем так. Особенности микрочастиц таковы, что их поведение зависит от геометрии окружения, природы частиц, действующих на них силовых полей и др. Все эти факторы учитываются уравнениями квантовой механики. Их решения дают вероятность обнаружения частицы в данный момент времени в данной точке пространства. Вероятностная природа та-

ких решений соответствует реальной экспериментальной ситуации. Многократные повторения одних и тех же измерений дают распределение значений, максимум которого соответствует наиболее вероятному значению. Большой информации о движении микрочастицы получить невозможно.

$$15. x = 0,1 \sin \left( 0,4\pi t + \frac{\pi}{2} \right).$$

$$16. 1,6 \text{ Гц.}$$

$$17. 5 \cdot 10^2 \text{ рад/с или } 79,6 \text{ Гц.}$$

$$18. Z = 20 \text{ Ом; } R_L = 1,6 \text{ Ом.}$$

$$19. \lambda = (17 \div 0,019) \text{ м.}$$

$$20. b = 1,4 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

$$21. \lambda = 5,7 \cdot 10^{-7} \text{ м.}$$

$$22. \frac{dE}{dt} = 4\pi\sigma T^4 R^2 = 5 \cdot 10^9 \text{ кг.}$$

$$23. \lambda = \frac{b}{T} = 2,9 \cdot 10^{-5} \text{ м.}$$

$$24. E = \frac{hc}{\lambda}.$$

$$25. \lambda = \frac{hc}{\Phi} = 6,2 \cdot 10^{-7} \text{ м; } v_m = 6,3 \cdot 10^5 \text{ м/с.}$$

$$26. N = 5.$$

$$27. p = \frac{E}{c} = 5,3 \cdot 10^{-9} \text{ Дж} \cdot \text{с/м.}$$

$$28. \lambda = \frac{h \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}{mv} = 1,99 \cdot 10^{-14} \text{ м.}$$

$$29. \lambda = \frac{h}{mv} = 2,2 \cdot 10^{-34} \text{ м.}$$

$$30. \Delta p_x \geq 6,65 \cdot 10^{-25} \text{ кг} \cdot \text{м/с.}$$

## Глава 6

1. Конечно, на практике очень сложно рассчитывать движение более чем двух частиц одновременно. Однако очень часто сложные системы можно приблизительно рассматривать состоящими из относительно неподвижной и движущейся частей. В молекуле воды тяжелые протоны можно считать неподвижными относительно друг друга, и лишь два электрона — движущимися. В случае NaCl внутренние электроны обоих атомов экранированы от воздействий на их внешние орбитали. Поэтому когда атом хлора захватывает один дополнительный электрон у атома натрия, задачу можно свести к взаимодействию только двух тел — ионов натрия и хлора.

2. Действительно, в системе не может быть двух и более электронов в одинаковом состоянии. Однако на каждом энерге-

тическом уровне могут находиться два электрона, которые имеют противоположно направленные спины.

3. Нет. Дело в том, что энергия кванта зависит от частоты. Поэтому возможно излучение и поглощение в принципе сколь угодно малых порций энергий — правда, на очень низких частотах (или, что то же, соответствующих больших длинах волн).

4. Эта сила уравнивается силой отталкивания со стороны других молекул, находящихся под поверхностным слоем молекул жидкости. Отталкивание возникает, как только молекулы поверхности приближаются к внутренним молекулам на расстояние меньше некоторого расстояния равновесия.

5. Воздушные пузыри легче всего образуются и стабильнее сохраняются в жидкостях с низкой плотностью и высокой вязкостью. По этой причине не существует, например, пузырей в жидкой ртути.

6. Конечно, сопротивление полупроводника. Ведь концентрация носителей в нем изменяется с температурой по экспоненте.

7.  $r_n = \frac{4\pi\varepsilon_0\hbar^2}{me^2} n^2$ ;  $r_1 = 5,3 \cdot 10^{-11}$  м;  $r_2 = 2,1 \cdot 10^{-10}$  м;  $r_3 = 4,8 \cdot 10^{-10}$  м.

8.  $r_n = \frac{4\pi\varepsilon_0\hbar^2}{mZe^2} n^2$ ;  $r_1 = 2,7 \cdot 10^{-11}$  м;  $r_2 = 1,1 \cdot 10^{-10}$  м;  $r_3 = 2,4 \cdot 10^{-10}$  м.

9. Три линии.

10.  $E_2 - E_1 = \frac{me^2}{8h^2\varepsilon_0^2} \left( \frac{1}{n_1} - \frac{1}{n_2} \right) = 1,62 \cdot 10^{-18}$  Дж = 10,2 эВ.

11.  $2,58 \cdot 10^{-18}$  Дж.

12. Li:  $1s^2 2s^1$ ; Be:  $1s^2 2s^2$ ; B:  $1s^2 2s^2 2p^1$ ; C:  $1s^2 2s^2 2p^2$ ; N:  $1s^2 2s^2 2p^3$ ;  
O:  $1s^2 2s^2 2p^3$ ; F:  $1s^2 2s^2 2p^5$ ; Ne:  $1s^2 2s^2 2p^6$ .

13.  $j_{\text{нас}} = 8,26 \cdot 10^{-12}$  А/м.

14.  $6,23 \cdot 10^{-7}$  м.

15.  $v = \frac{gd^2}{18\eta} (\rho_v - \rho_{\text{возд}}) = 0,26$  м/с. При вычислениях плотностью воздуха по сравнению с плотностью воды можно пренебречь, так как при нормальных условиях  $\rho_{\text{возд}} = 1,29$  кг/м<sup>3</sup>.

## Глава 7

1. Конечно, масса ядра меньше массы входящих в него частиц на величину дефекта масс, соответствующую энергии, которая выделилась при слиянии частиц в ядро.

2. Несомненно так. Ведь при химических реакциях синтеза, например, при сгорании водорода в кислороде, когда образуются молекулы воды, также выделяется определенная энергия, а

значит, возникает и дефект масс  $\Delta m = \Delta E/c^2$ , где  $\Delta E$  — выделившаяся энергия, а  $c$  — скорость света.

3. Поскольку размеры ядер ничтожно малы по сравнению с размерами атомов, то прямые столкновения ядер чрезвычайно редки. Ядро при движении в веществе быстро теряет кинетическую энергию, передавая ее атомам (и прежде всего — электронам внешних оболочек атомов) вещества. Оставшейся энергии оказывается недостаточно, чтобы преодолеть потенциальный барьер, возникающий при сближении одинаково заряженных частиц (в данном случае ядер дейтерия).

4. Период полураспада ядерного топлива в реакторе станции составляет сотни лет. Поэтому за 10—20 лет естественного распада активность этого вещества практически не меняется.

5. Главная опасность радиоактивного облучения заключается в нарушении биологических процессов в клетках организма, т. е. во внутренних процессах.

6. При аннигиляции дефект массы составляет 100% от массы соединившихся частиц, так как они перестают существовать в своем первоначальном виде и их масса полностью переходит в излучение. При образовании же атомов водорода дефект массы очень невелик. О нем можно судить по энергии ионизации атома водорода.

$$7. \frac{N_t}{N_0} = 0,25.$$

$$8. \frac{N_t}{N_0} = 6 \cdot 10^{-2}.$$

9. Конечный продукт  ${}_{92}^{234}\text{U}$ .

10. Конечный продукт  ${}_{94}^{244}\text{Pu}$ .

11.  $4,7 \cdot 10^{-5}$  г.

$$12. t = -\frac{T}{0,693} \ln \frac{N_t}{N} = 1803 \text{ года.}$$

13. а)  $(100 \div 200)$  рад; б) 2000 рад; в) 2000 рад; г) 200 рад;

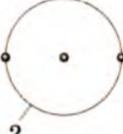
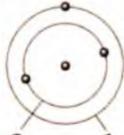
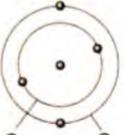
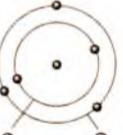
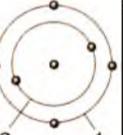
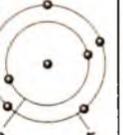
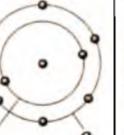
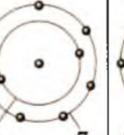
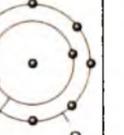
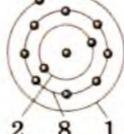
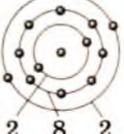
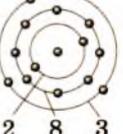
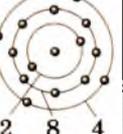
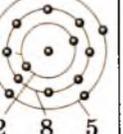
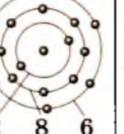
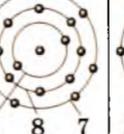
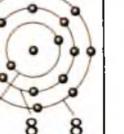
д)  $(400 \div 500)$  рад.

14. 3600 рад.

$$15. \nu = \frac{m_e c^2}{h} = 2,23 \text{ Гц.}$$

$$16. E = \frac{2}{3} m_p c^2 = 10^{-10} \text{ Дж} = 625 \text{ МэВ.}$$

**Электронное строение атомов трех первых периодов  
Периодической системы элементов**

Периоды	Ряды	ГРУППЫ ЭЛЕМЕНТОВ							
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
1	I	<p><b>H 1</b></p>  <p>1 Водород</p>							<p><b>He 2</b></p>  <p>2 Гелий</p>
2	II	<p><b>Li 3</b></p>  <p>2 1 Литий</p>	<p><b>Be 4</b></p>  <p>2 2 Бериллий</p>	<p><b>B 5</b></p>  <p>2 3 Бор</p>	<p><b>C 6</b></p>  <p>2 4 Углерод</p>	<p><b>N 7</b></p>  <p>2 5 Азот</p>	<p><b>O 8</b></p>  <p>2 6 Кислород</p>	<p><b>F 9</b></p>  <p>2 7 Фтор</p>	<p><b>Ne 10</b></p>  <p>2 8 Неон</p>
3	III	<p><b>Na 11</b></p>  <p>2 8 1 Натрий</p>	<p><b>Mg 12</b></p>  <p>2 8 2 Магний</p>	<p><b>Al 13</b></p>  <p>2 8 3 Алюминий</p>	<p><b>Si 14</b></p>  <p>2 8 4 Кремний</p>	<p><b>P 15</b></p>  <p>2 8 5 Фосфор</p>	<p><b>S 16</b></p>  <p>2 8 6 Сера</p>	<p><b>Cl 17</b></p>  <p>2 8 7 Хлор</p>	<p><b>Ar 18</b></p>  <p>2 8 8 Аргон</p>

# УКАЗАТЕЛЬ

---

## НЕКОТОРЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ТЕРМИНОВ

Как в физике, так и в естествознании в целом имеется много вполне понятных терминов, используемых и в обыденной жизни (сила, давление, время и др.). Вместе с тем достаточно часто встречаются термины и понятия, «обыденный» смысл которых никак не проявляет их физической сути и даже может ввести в заблуждение (например, «дырка», «сопротивление», «магическое число» и т. п.). В этом указателе наряду с такими «двусмысленными» понятиями приведены и некоторые специфические термины (аннигиляция, квант и т. п.).

- |   |  |
|---|--|
| <b>Абсолютно черное тело</b> 142        | <b>Дифракция</b> 136                       |
| <b>Авогадро число</b> 65                | <b>Диффузия</b> 74                         |
| <b>Аннигиляция</b> 203                  | <b>Диэлектрическая восприимчивость</b> 100 |
| <b>Античастица</b> 203                  | <b>Диэлектрическая проницаемость</b> 92    |
| <b>Аэрация почвы</b> 50                 | <b>Доза облучения</b> 197                  |
| <b>Биопотенциал</b> 101                 | <b>Домены</b> 100, 107                     |
| <b>Вектор</b> 12—14                     | <b>Дырка</b> 177                           |
| <b>Вес</b> 29                           | <b>Емкостное сопротивление</b> 120         |
| <b>Волны поперечные, продольные</b> 129 | <b>Жидкий кристалл</b> 165                 |
| <b>Волны когерентные</b> 134            | <b>Зарядовое число</b> 185                 |
| <b>Вязкость</b> 51, 74, 168             | <b>Импульс</b> 26, 32                      |
| <b>Гармонические колебания</b> 114      | <b>Импульс силы</b> 26                     |
| <b>Гибридизация связи</b> 162           | <b>Инверсная заселенность</b> 159          |
| <b>Гидродинамика</b> 47                 | <b>Индуктивность</b> 109                   |
| <b>Дефект масс</b> 187                  |  |

- Индукцированное излучение** 158  
**Инерции закон** 24, 25  
**Интеграл неопределенный** 11  
**Интеграл определенный** 10  
**Интегрирование** 10—12
- Капельная модель ядра** 188  
**Квант** 143  
**Квантовое число** 148  
**Колебательный контур** 116  
**Корпускулярно-волновой дуализм** 145  
**Критическая масса** 194  
**Круговая частота** 114
- Лазер** 158  
**Лоренца преобразования** 86
- Магическое число** 187  
**Магнетики** 106  
**Магнитная постоянная** 105  
**Магнитная проницаемость** 106  
**Макропараметры** 58  
**Масса** 25, 29  
**Массовое число** 185  
**Меченые атомы** 200  
**Микропараметры** 61  
**Момент импульса** 34  
**Момент инерции** 27  
**Момент силы** 26  
**Мощность дозы** 197
- Напряженность поля** 93, 105  
**Нуклон** 185
- Относительная биологическая эффективность** 197
- Переноса явления** 74  
**Период колебаний** 113  
**Период полураспада** 192
- Поверхностного натяжения энергия** 166  
**Поглощательная способность** 142  
**Полупроводник собственный, примесный** 178  
**Поляризация вещества** 100  
**Поляризация света** 140  
**Порог слышимости** 127  
**Порядок ближний, дальний** 165  
**Потенциал** 96  
**Потенциальная яма, потенциальный барьер** 38  
**Примесь акцепторная, донорная** 179  
**Принцип дополнителности** 146  
**Принцип неопределенности** 149  
**Принцип относительности** 41  
**Производная** 8  
**Процессы обратимые, необратимые** 79
- Работа** 36, 76  
**Работа выхода** 144  
**Радиостимуляция** 200  
**Размерность** 16  
**Резонанс напряжений** 122  
**Резонанс токов** 122
- Сегнетоэлектрики** 100  
**Сила** 23, 33  
**Система единиц** 14  
**Система отсчета** 25, 41  
**Скорость** 18, 20  
**Собственная частота** 117  
**Сопротивление емкостное, индуктивное** 120, 121  
**Спин** 159  
**Статистический вес** 84  
**Статистический метод** 84  
**Степень свободы** 78

Суперпозиции принцип 93

Температура 66

Тепловая смерть 8

Теплоемкость 77

Теплота 76

Термодинамики начала 76,  
81, 87

Термодинамический метод  
60

Ток смещения 110

Тормозное излучение 157

Туннельный эффект 149

Удельная проводимость 103

Ультрафиолетовая катастро-  
фа 143

Уравнение волны 128

Ускорение 20

Фотон 143

Фронт волны 128

Функция 7

Функция распределения 68,  
72

Частота колебаний 115

Электрическая емкость 99

Электрический заряд 91

Электрическое поле 92

Электронные переходы 156

Элементарная частица 201

Энергетическая зона 175

Энергия 35

Энергия связи 187

Энтропия 86

Ядерные силы 186

# ОГЛАВЛЕНИЕ

---

## Глава 1. Предварительные сведения

1.1. Физика и естествознание . . . . .	3
1.2. Краткое математическое введение . . . . .	6
1.2.1. Графики функций . . . . .	7
1.2.2. Дифференцирование функций . . . . .	7
1.2.3. Интегрирование . . . . .	10
1.2.4. Операции с векторами . . . . .	12
1.3. Системы единиц измерения . . . . .	14
Контрольные вопросы и упражнения . . . . .	17

## Глава 2. Механическое движение

2.1. Кинематика . . . . .	18
2.1.1. Скорость . . . . .	18
2.1.2. Ускорение . . . . .	20
2.1.3. Сложное движение . . . . .	22
2.2. Законы динамики . . . . .	23
2.2.1. Первый закон Ньютона . . . . .	24
2.2.2. Второй закон Ньютона . . . . .	25
2.2.3. Третий закон Ньютона . . . . .	27
2.3. Закон всемирного тяготения . . . . .	28
2.4. Применение законов динамики к анализу полета ИСЗ . . . . .	31
2.5. Законы сохранения . . . . .	32
2.5.1. Закон сохранения импульса . . . . .	32
2.5.2. Закон сохранения момента импульса . . . . .	34
2.5.3. Закон сохранения энергии . . . . .	35
2.5.4. Закон сохранения тяжелых частиц . . . . .	39
2.6. Релятивистская механика . . . . .	40
2.6.1. «Здравый смысл» и действительность . . . . .	40
2.6.2. Принципы относительности . . . . .	41
2.6.3. Сокращение длины . . . . .	43
2.6.4. Замедление времени. Парадокс близнецов . . . . .	44

2.6.5. Одновременность событий . . . . .	46
2.6.6. Релятивистское сложение скоростей . . . . .	46
2.7. Движение жидкостей и газов . . . . .	47
2.7.1. Линии и трубки тока. Уравнение непрерывности струи . . . . .	47
2.7.2. Уравнение Бернулли . . . . .	49
2.7.3. Течение вязкой жидкости . . . . .	51
Контрольные вопросы и упражнения . . . . .	53
<b>Глава 3. Молекулярно-кинетическая теория вещества</b>	
3.1. Общие представления молекулярно-кинетической теории строения вещества . . . . .	56
3.2. Два метода рассмотрения явлений природы . . . . .	57
3.2.1. Макропараметры газа . . . . .	57
3.2.2. Микропараметры газа . . . . .	60
3.3. Статистика идеального газа . . . . .	61
3.3.1. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории газов . . . . .	62
3.3.2. Теоретическое обоснование газовых законов . . . . .	63
3.3.3. Физический смысл температуры . . . . .	65
3.3.4. Распределение Максвелла—Больцмана . . . . .	66
3.3.5. Статистические методы в биологии . . . . .	71
3.4. Явления переноса в газах . . . . .	73
3.5. Термодинамика . . . . .	75
3.5.1. Первое начало термодинамики. Теплоемкость . . . . .	75
3.5.2. Обратимые и необратимые процессы . . . . .	78
3.5.3. Второе начало термодинамики . . . . .	80
3.5.4. Статистическое толкование второго начала термодинамики . . . . .	83
3.5.5. Третье начало термодинамики . . . . .	86
3.5.6. О термодинамике живых систем . . . . .	86
Контрольные вопросы и упражнения . . . . .	88
<b>Глава 4. Электрические и магнитные явления</b>	
4.1. Электрические заряды и поля . . . . .	91
4.1.1. Электрическое поле неподвижных зарядов (электростатическое поле) . . . . .	91
4.1.2. Потенциал электростатического поля . . . . .	95
4.1.3. Проводники и диэлектрики в электрическом поле . . . . .	97
4.1.4. Биопотенциалы . . . . .	100
4.2. Электромагнитное поле . . . . .	100
4.2.1. Электрический ток . . . . .	100
4.2.2. Магнитное поле . . . . .	103
4.2.3. Электромагнитная индукция . . . . .	107

4.2.4. Электрические и магнитные свойства биологических тканей	108
4.3. Уравнения Максвелла	109
Контрольные вопросы и упражнения	110
<b>Глава 5. Волновые и корпускулярные свойства материи</b>	
5.1. Колебания	112
5.1.1. Механические колебания	114
5.1.2. Электромагнитные колебания	115
5.1.3. Переменный электрический ток	117
5.1.4. Роль колебаний в биологии	123
5.2. Волны	126
5.2.1. Уравнение волны	126
5.2.2. Электромагнитные волны	129
5.3. Волновые свойства света	131
5.3.1. Интерференция света	133
5.3.2. Дифракция света	135
5.3.3. Поляризация света	139
5.4. Квантовая оптика	140
5.4.1. Недостатки волновой теории света	140
5.4.2. Корпускулярно-волновой дуализм. Гипотеза де Бройля	144
5.5. Элементы квантовой механики	146
5.5.1. Уравнение Шредингера	146
5.5.2. Туннельный эффект	148
5.5.3. Соотношение неопределенностей Гейзенберга	148
Контрольные вопросы и упражнения	149
<b>Глава 6. Строение вещества</b>	
6.1. Строение атома	152
6.1.1. Строение атома водорода и постулаты Бора	152
6.1.2. Электронные переходы в атомах	155
6.1.3. Лазеры	157
6.2. Периодическая система элементов	158
6.3. Строение молекул	160
6.3.1. Ионная связь	160
6.3.2. Ковалентная связь	161
6.3.3. Гибридизация	161
6.4. Жидкое состояние вещества	162
6.4.1. Строение жидкости	162
6.4.2. Поверхностное натяжение	165
6.4.3. Внутреннее трение	167
6.4.4. Движение вязкой жидкости	168
6.5. Кристаллическое вещество	169
6.5.1. Статистика электронов в металлах	169

6.5.2. Термоэлектронная эмиссия .....	171
6.5.3. Зонная теория твердых тел .....	173
6.5.4. Полупроводники .....	177
Контрольные вопросы и упражнения .....	182
<b>Глава 7. Строение ядра и элементарные частицы</b>	
7.1. Свойства и строение ядра .....	184
7.1.1. Свойства ядер .....	184
7.1.2. Природа ядерных сил .....	185
7.1.3. Энергия связи нуклонов в ядре .....	186
7.2. Радиоактивность ядер .....	188
7.2.1. Виды радиоактивности .....	188
7.2.2. Основные законы радиоактивного распада .....	191
7.3. Деление и синтез ядер .....	192
7.3.1. Деление ядер. Цепная реакция .....	192
7.3.2. Термоядерный синтез .....	194
7.4. Влияние радиоактивных излучений на биологические системы .....	195
7.4.1. Ионизирующая способность радиоактивного излучения .....	195
7.4.2. Единицы дозы облучения .....	196
7.4.3. Действие радиоактивного излучения на клетку ..	197
7.4.4. Использование радиоактивных излучений в биологии. ....	199
7.5. Некоторые сведения об элементарных частицах .....	200
7.5.1. Классификация элементарных частиц .....	201
7.5.2. Античастицы .....	202
Контрольные вопросы и упражнения .....	203
Ответы на контрольные вопросы и упражнения .....	205
Указатель некоторых физических терминов .....	217

*Учебное издание*

**Бордовский Геннадий Алексеевич**

## **ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ**

Пособие для вузов

Зав. редакцией *Б. В. Понкратов*  
Ответственный редактор *Б. В. Понкратов*  
Художественное оформление *А. Л. Кашеков*  
Технические редакторы *В. Ф. Козлова, М. В. Биденко*  
Компьютерная верстка *Г. М. Татарина*  
Корректор *Е. В. Морозова*

Санитарно-эпидемиологическое заключение  
№ 77.99.02.953.Д.006315.08.03 от 28.08.2003.

Подписано к печати 30.07.04. Формат 60x90 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага типографская.  
Гарнитура «Школьная». Печать офсетная. Усл. печ. л. 14,0.  
Тираж 3 000 экз. Заказ № 10268.

ООО «Дрофа». 127018, Москва, Сушеvский вал, 49.

По вопросам приобретения продукции  
издательства «Дрофа» обращаться по адресу:

127018, Москва, Сушеvский вал, 49.

Тел.: (095) 795-05-50, 795-05-51. Факс: (095) 795-05-52.

Торговый дом «Школьник».

109172, Москва, ул. Малые Каменщики, д. 6, стр. 1А.

Тел.: (095) 911-70-24, 912-15-16, 912-45-76.

Магазины «Переплетные птицы»:

127018, Москва, ул. Октябрьская, д. 89, стр. 1.

Тел.: (095) 912-45-76;

140408, Московская обл., г. Коломна, Голутвин,  
ул. Октябрьской революции, 366/2.

Тел.: (095) 741-59-76.

Отпечатано в полном соответствии с качеством  
предоставленных диапозитивов в ОАО «Тульская типография».  
300600, г. Тула, пр. Ленина, 109.