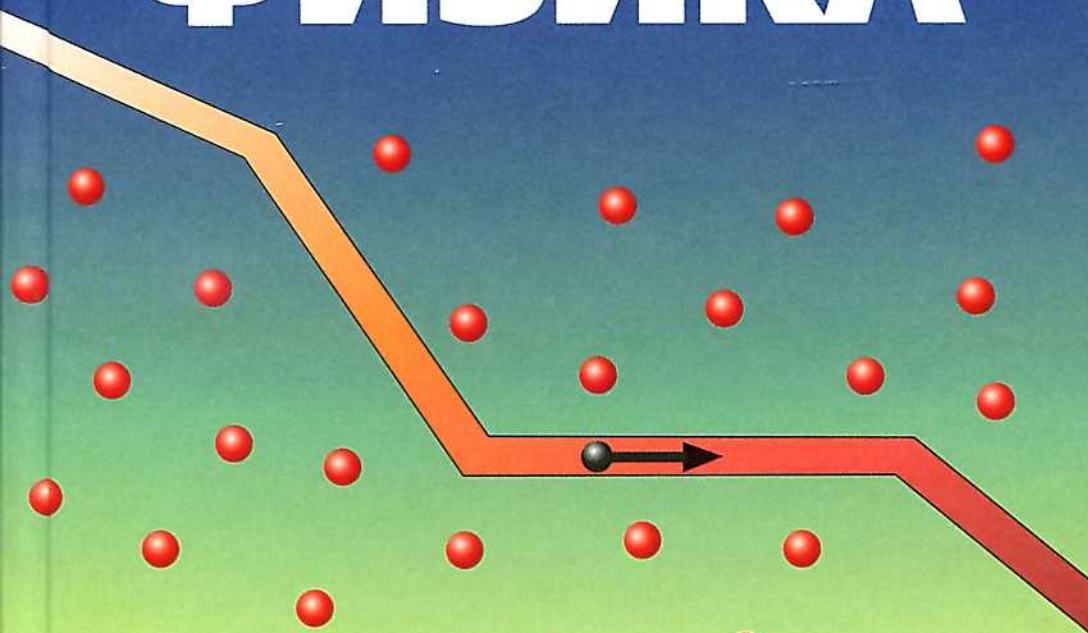


А

Российская академия наук
Российская академия образования
Издательство «Просвещение»

Академический школьный учебник

ФИЗИКА



10


ПРОСВЕЩЕНИЕ
ИЗДАТЕЛЬСТВО



Российская академия наук
Российская академия образования
Издательство «Просвещение»

Академический школьный учебник

ФИЗИКА

10 класс

**Учебник для общеобразовательных
учреждений и школ
с углубленным изучением
физики**

Профильный уровень

Под редакцией А. А. Пинского, О. Ф. Кабардина

Рекомендовано
Министерством образования и науки
Российской Федерации

13-е издание

Москва
«Просвещение»
2011

УДК 373.167.1:53

ББК 22.3я72

Ф50

Серия «Академический школьный учебник» основана в 2005 году

Проект «Российская академия наук, Российская академия образования, издательство «Просвещение» — российской школе»

Руководители проекта:

вице-президент РАН акад. **В. В. Козлов**,

президент РАО акад. **Н. Д. Никандров**,

генеральный директор издательства «Просвещение»

чл.-корр. РАО **А. М. Кондаков**

Научные редакторы серии:

акад. РАО, д-р пед. наук **А. А. Кузнецов**,

акад. РАО, д-р пед. наук **М. В. Рыжаков**,

д-р экон. наук **С. В. Сидоренко**

Авторы:

О. Ф. Кабардин, В. А. Орлов, Э. Е. Эвенчик, С. Я. Шамаш, С. И. Кабардина, Н. И. Шефер

На учебник получены положительные заключения Российской академии наук (№ 2-10106-5215/451 от 02.07.2007 г.) и Российской академии образования (№ 01-171/5/7 от 06.07.2006 г.)

Физика. 10 класс : учеб. для общеобразоват. учреждений
Ф50 дений и шк. с углубл. изучением физики : профил. уровень / [О. Ф. Кабардин, В. А. Орлов, Э. Е. Эвенчик и др.]; под ред. А. А. Пинского, О. Ф. Кабардина; Рос. акад. наук, Рос. акад. образования, изд-во «Просвещение». — 13-е изд. — М. : Просвещение, 2011. — 431 с. : ил. — (Академический школьный учебник). — ISBN 978-5-09-025616-2.

УДК 373.167.1:53

ББК 22.3я72

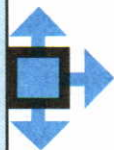
ISBN 978-5-09-025616-2

© Издательство «Просвещение», 2009

© Художественное оформление.

Издательство «Просвещение», 2009

Все права защищены



МЕХАНИКА



ГЛАВА 1

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ЗАКОНЫ МЕХАНИКИ

§ 1

Основные понятия и уравнения кинематики

Механическим движением тела называется изменение его положения в пространстве относительно других тел с течением времени.

Основной задачей механики является определение положения тел и их скоростей в любой момент времени.

Раздел механики, в котором движение тел рассматривается без выяснения причин этого движения, называется *кинематикой*.

Для определения положения тела в любой момент времени необходимо выбрать *систему отсчета*, в которой рассматривается движение этого тела. Под системой отсчета понимают *тело отсчета*, которое условно считается неподвижным, *систему координат*, связанную с телом отсчета, и *часы*, также связанные с телом отсчета.

В кинематике система отсчета выбирается в соответствии с конкретными условиями задачи. Например, при запуске автоматической межпланетной станции на Венеру ее начальные координаты и начальная скорость определяются относительно места старта на космодроме на поверхности Земли. При выведении станции на орбиту искусственного спутника Земли целесообразно пользоваться геоцентрической системой отсчета с началом координат в центре Земли. На траектории полета станции к Венере необходимо воспользоваться гелиоцентрической системой отсчета с началом координат в центре Солнца. При посадке же станции на поверхность Венеры важно знать скорость и координаты станции относительно поверхности планеты, поэтому целесообразно систему отсчета связать с этой планетой.

Линия, по которой движется некоторая точка тела, называется *траекторией* движения этой точки. Длина участка траектории, пройденного точкой при ее движении, называется пройденным *путем*. Вектор, соединяющий начальную и конечную точки траектории, называется *перемещением*.

Движение тела, при котором отрезок, соединяющий две любые точки тела, переносится в процессе движения параллельно самому себе, называется *поступательным движением*. При поступательном движении все точки тела перемещаются одинаково, и для описания движения всего тела достаточно выяснить зависимость координат от времени для произвольно выбранной точки тела.

Тело, размерами которого в условиях поставленной задачи можно пренебречь, называют *материальной точкой*.

Возможность не учитывать размеры тела при механическом движении определяется не размерами самого тела, а конкретными условиями рассматриваемого движения. Одно и то же тело в одних условиях можно рассматривать как материальную точку, а в других такое упрощение недопустимо.

Например, космический корабль при описании его движения по орбите наблюдателем с поверхности Земли можно принять за материальную точку, так как размеры корабля здесь роли не играют. Однако космонавт, находящийся внутри космического корабля, не может считать его материальной точкой. Не может рассматривать космический корабль как материальную точку и другой космонавт, находящийся на космической станции, к которой приближается этот корабль. Они должны учитывать как ориентацию космического корабля в пространстве, так и его вращение.

Для определения координат тел в любой системе отсчета необходимо уметь измерять расстояние между двумя точками.

Проведение измерений любой физической величины заключается в сравнении измеряемой величины с эталоном, условно принятым за единицу измерения данной физической величины.

В Международной системе единиц (система интернациональная — СИ) за единицу длины принят метр (от древнегреческого слова «метрон», что означает «мера»). Первоначально (с 1799 г.) метр определялся как одна сорокамиллионная часть земного меридиана, проходящего через Париж. В 1872 г. на Международной конференции мер было принято считать метром длину специально изготовленного эталона длины, хранящегося в Севре, близ Парижа. В 1983 г. по международному соглашению принято новое определение метра: метр равен длине пути, проходимого светом в вакууме за интервал времени $1/299\,792\,458$ секунды. Новое определение метра позволяет повысить точность измерений расстояний в специальных исследованиях.

Зависимость координат тела от времени исследуется на основе измерений времени. Для измерения времени применяются различные природные, периодически повторяющиеся процессы.

Естественной мерой времени служат сутки — период вращения Земли вокруг своей оси.

Однако вращение Земли вокруг своей оси нельзя считать идеально равномерным. Из-за тормозящего действия приливов в океане и в земной мантии продолжительность суток увеличивается примерно на 0,001 с за столетие. На скорость вращения Земли оказывают влияние направление ветров и океанических течений, изменение распределения вещества внутри Земли, происходящее при землетрясениях. Значительно более устойчивыми и воспроизводимыми являются процессы, связанные с излучением энергии атомами. Поэтому в СИ единица времени — секунда — определяется следующим образом: 1 с равна 9 192 631 770 периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133.

При *координатном способе* задания положения тела в декартовой системе координат движение материальной точки определяется тремя функциями, выражающими зависимость координат от времени (рис. 1.1):

$$x = x(t), \quad y = y(t) \quad \text{и} \quad z = z(t).$$

Эта зависимость координат от времени называется *законом движения* (или уравнением движения).

Скорость. Для количественной характеристики процесса движения тела вводится понятие скорости движения. *Мгновенной скоростью* $\vec{v}$ поступательного движения материальной точки в момент времени t называется предел отношения малого перемещения $\Delta \vec{s}$ к малому промежутку времени Δt , за который произошло это перемещение, при условии $\Delta t \rightarrow 0$:

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{s}}{\Delta t}. \quad (1.1)$$

Такой предел называется производной перемещения по времени. Проекция скорости на ось прямоугольной декартовой системы координат равна производной координаты по времени. Например:

$$v_x = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{dx}{dt} = x'.$$

Мгновенная скорость — векторная величина.

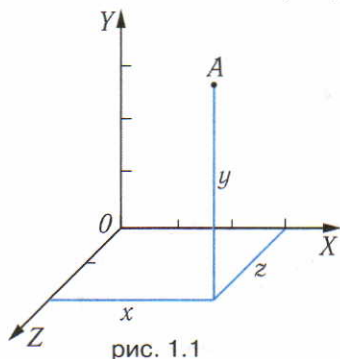


рис. 1.1

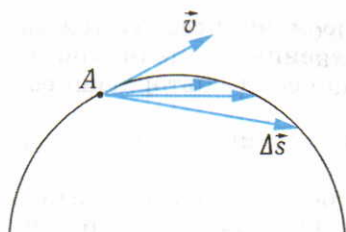


рис. 1.2

При последовательном уменьшении длительности промежутка времени Δt направление вектора перемещения $\Delta \vec{s}$ приближается к касательной в точке A траектории движения, через которую проходит материальная точка в момент времени t (рис. 1.2). Поэтому вектор $\vec{v}$ скорости лежит на касательной к траектории движения материальной точки в точке A

и направлен в сторону движения материальной точки. Физический смысл выбора направления вектора скорости тела по касательной к траектории движения заключается в следующем. Как показывает опыт, при таком выборе вектор скорости указывает направление, в котором будет двигаться материальная точка из точки A траектории, если в момент прохождения этой точки действие любых других тел на нее прекратится.

Формула (1.1) позволяет установить единицу скорости. В Международной системе (СИ) единицей расстояния является метр, единицей времени — секунда, поэтому единица скорости в СИ — метр в секунду (1 м/с). Скорость один метр в секунду равна скорости прямолинейно и равномерно движущейся точки, при которой точка за время 1 с перемещается на расстояние 1 м.

Движение с постоянной по модулю и направлению скоростью называется *равномерным прямолинейным движением*. При равномерном прямолинейном движении тело движется по прямой и за любые равные промежутки времени проходит одинаковые пути.

При равномерном движении график зависимости модуля скорости v от времени t является прямой, параллельной оси абсцисс (рис. 1.3). Путь s , пройденный телом за время t при равномерном движении со скоростью v , определяется уравнением

$$s = vt. \quad (1.2)$$

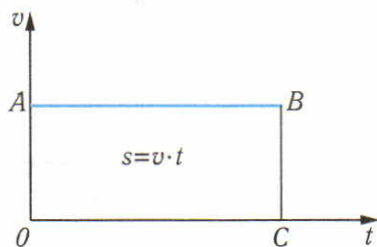


рис. 1.3

Если площадь прямоугольника OABC на графике зависимости скорости v от времени t выразить в единицах произведения скорости v на время t , то она равна пройденному пути s :

$$OA \cdot OC = vt.$$

Движение любого тела в реальных условиях никогда не бывает строго равномерным и

прямолинейным. Движение, при котором тело за равные промежутки времени совершает неодинаковые перемещения, называют *неравномерным движением*.

Ускорение. При неравномерном поступательном движении скорость тела изменяется с течением времени. Процесс изменения скорости тела характеризуется *ускорением*. Ускорением называется векторная величина $\vec{a}$, равная пределу отношения малого изменения вектора скорости $\Delta\vec{v}$ к малому промежутку времени Δt , за которое произошло это изменение, при условии $\Delta t \rightarrow 0$:

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}. \quad (1.3)$$

Этот предел называется производной скорости по времени. Проекция ускорения на координатную ось является первой производной проекции скорости на эту ось или второй производной координаты по времени. Например:

$$a_x = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v_x}{\Delta t} = \frac{dv_x}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} = x''.$$

Направление вектора $\vec{a}$ ускорения совпадает с направлением вектора $\Delta\vec{v}$ изменения скорости при очень малых значениях изменения времени $\Delta t \rightarrow 0$. Вектор ускорения $\vec{a}$ при криволинейном движении тела может быть направлен по отношению к вектору $\vec{v}$ скорости под любым углом α в пределах $0 \leq \alpha \leq \pi$. Его можно представить в виде суммы двух составляющих: тангенциальной и нормальной. Тангенциальное ускорение $\vec{a}_t$ направлено по касательной к траектории, нормальное ускорение $\vec{a}_n$ — по нормали к касательной (рис. 1.4). Из рисунка следует, что модуль a полного ускорения равен:

$$a = \sqrt{a_n^2 + a_t^2}. \quad (1.4)$$

Равноускоренное движение. Движение с постоянным по модулю и направлению ускорением называется *равноускоренным движением*. При равноускоренном прямолинейном движении ускорение движущегося тела равно отношению изменения вектора скорости $\Delta\vec{v}$ к интервалу времени Δt , причем интервал времени может быть любым, а не только очень малым:

$$\vec{a} = \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}. \quad (1.5)$$

Если в начальный момент времени $t=0$ скорость тела равна $\vec{v}_0$, а в момент времени t равна $\vec{v}$, то

$$\Delta\vec{v} = \vec{v} - \vec{v}_0, \quad \Delta t = t, \quad \vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t. \quad (1.6)$$

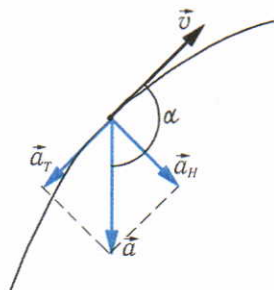


рис. 1.4

При равноускоренном прямолинейном движении векторы $\vec{v}$ и $\vec{a}$ могут быть сонаправлены или направлены противоположно. При сонаправленных векторах $\vec{v}$ и $\vec{a}$ модуль скорости v в любой момент времени вычисляется по формуле

$$v = v_0 + at. \quad (1.7)$$

При противоположном направлении векторов $\vec{v}$ и $\vec{a}$ модуль скорости v равноускоренного прямолинейного движения вычисляется по формуле

$$v = v_0 - at. \quad (1.8)$$

В формулах (1.7) и (1.8) буквой a обозначен модуль ускорения. Если начальная скорость v_0 равна нулю, то скорость равноускоренного прямолинейного движения определяется формулой

$$v = at. \quad (1.9)$$

График зависимости модуля скорости v равноускоренного прямолинейного движения от времени t при $v_0 = 0$ представлен на рисунке 1.5.

Примерно равноускоренным движением является падение тел на Землю с небольшой высоты в тех случаях, когда сопротивление воздуха пренебрежимо мало. Падение в пустоте называют *свободным падением*. Все тела при свободном падении в данном месте движутся с одинаковым ускорением. Ускорение, с которым падают на Землю тела в пустоте, называют *ускорением свободного падения*. Модуль ускорения свободного падения обозначается буквой g . В различных местах около поверхности земного шара ускорение свободного падения примерно одинаково и равно:

$$g \approx 9,8 \text{ м/с}^2.$$

При равноускоренном прямолинейном движении с начальной скоростью $\vec{v}_0$, сонаправленной с вектором ускорения $\vec{a}$, графиком зависимости модуля скорости v от времени t является прямая AB (рис. 1.6).

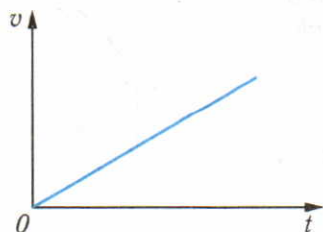


рис. 1.5

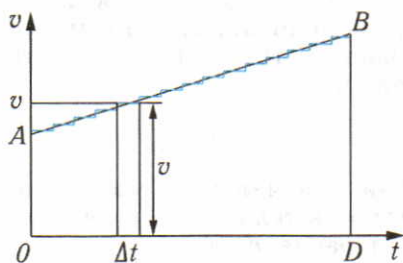


рис. 1.6

Заменим приближенно прямолинейное равноускоренное движение последовательностью равномерных прямолинейных движений, как это представлено на рисунке 1.6. Путь, пройденный за каждый интервал времени Δt при равномерном движении, равен площади соответствующего прямоугольника на графике зависимости скорости от времени. Сумма площадей всех прямоугольников на графике равна площади трапеции $OABD$. Следовательно, в единицах произведения vt площадь под графиком скорости равноускоренного движения равна пройденному пути. Площадь трапеции $OABD$ равна сумме площадей прямоугольника $OACD$ и треугольника ABC (рис. 1.7). Поэтому путь s , пройденный телом за время t , определяется уравнением

$$s = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2 = v_0 t + \frac{a t^2}{2}. \quad (1.10)$$

Если векторы скорости $\vec{v}$ и ускорения $\vec{a}$ направлены противоположно, то аналогичным способом можно получить, что пройденный за время t путь s равен:

$$s = v_0 t - \frac{a t^2}{2}. \quad (1.11)$$

Если $v_0 = 0$, из формулы (1.10) следует:

$$s = \frac{a t^2}{2}. \quad (1.12)$$

Из формул (1.12) и (1.9) следует:

$$s = \frac{v^2}{2a}, \quad (1.13)$$

$$v = \sqrt{2as}, \quad (1.14)$$

$$a = \frac{v^2}{2s}. \quad (1.15)$$

Из формулы (1.12) также следует:

$$a = \frac{2s}{t^2} \quad (1.16)$$

и

$$t = \sqrt{\frac{2s}{a}}. \quad (1.17)$$

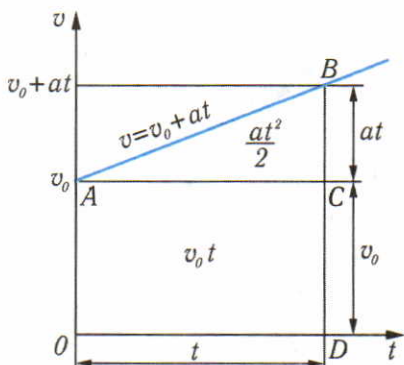


рис. 1.7

Равномерное движение по окружности. В природе и технике часто наблюдается движение тел по окружности с постоянной по модулю скоростью. Примерно так движутся Лу-

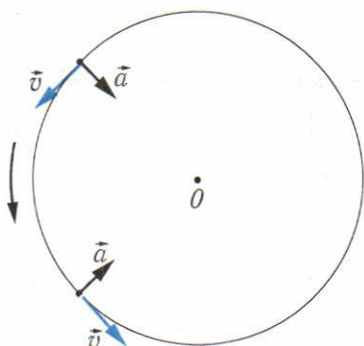


рис. 1.8

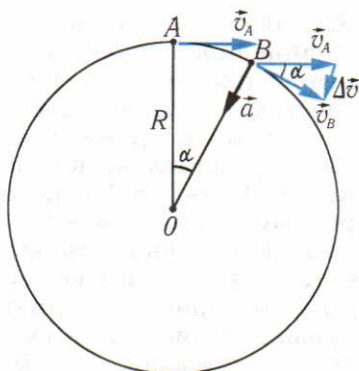


рис. 1.9

на вокруг Земли и Земля вокруг Солнца. При равномерном движении материальной точки по окружности вектор скорости $\vec{v}$ изменяется по направлению, но остается постоянным по модулю. Поскольку направление вектора скорости изменяется со временем, равномерное движение по окружности является ускоренным движением.

Если модуль вектора скорости $\vec{v}$ при движении по окружности не изменяется со временем, то тангенциальное ускорение равно нулю, в любой момент времени вектор ускорения перпендикулярен вектору скорости и является нормальным ускорением: $\vec{a} = \vec{a}_n$. Так как вектор ускорения при равномерном движении по окружности в любой момент времени t направлен к центру окружности, его называют *центростремительным ускорением* (рис. 1.8).

Для определения модуля вектора центростремительного ускорения при равномерном движении по окружности найдем отношение модуля изменения вектора скорости к малому интервалу времени Δt , за который произошло это изменение (рис. 1.9). Так как интервал времени Δt очень мал, то угол α между векторами скорости $\vec{v}_A$ и $\vec{v}_B$ в точках A и B окружности тоже очень мал. Поэтому

$$\Delta v = v\alpha. \quad (1.18)$$

Угол α между векторами скорости в точках A и B равен углу α между радиусами, соединяющими данные точки с центром окружности. Этот угол равен отношению длины дуги AB к радиусу окружности. Длина дуги AB равна $v\Delta t$, следовательно,

$$\alpha = \frac{v\Delta t}{R}. \quad (1.19)$$

Используя выражения (1.18) и (1.19), получим, что модуль центростремительного ускорения a при равномерном движении по окружности равен:

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v\alpha}{\Delta t} = \frac{v\Delta t}{R\Delta t} = \frac{v^2}{R}. \quad (1.20)$$

Модуль вектора центростремительного ускорения $\vec{a}$ при равномерном движении тела по окружности не изменяется, но его направление непрерывно изменяется. Поэтому равномерное движение по окружности не является движением с постоянным ускорением, т. е. не является равноускоренным движением.

Интервал времени, за который тело совершает один оборот по окружности, называется *периодом обращения* и обозначается буквой T .

При равномерном движении по окружности радиусом R со скоростью v период обращения T можно определить, разделив длину окружности на скорость v :

$$T = \frac{2\pi R}{v}. \quad (1.21)$$

Величина, обратная периоду T , называется *частотой обращения* и обозначается буквой ν :

$$\nu = \frac{1}{T}. \quad (1.22)$$

Из формул (1.20)—(1.22) следует:

$$a = \frac{4\pi^2 R}{T^2}, \quad (1.23)$$

$$a = 4\pi^2 R \nu^2. \quad (1.24)$$

Равномерное движение материальной точки по окружности можно характеризовать *угловой скоростью*. Угловой скоростью ω равномерного движения точки по окружности радиусом R называется отношение угла $\Delta\phi$ поворота радиуса, соединяющего материальную точку с центром окружности, к интервалу времени Δt , за который произошел этот поворот:

$$\omega = \frac{\Delta\phi}{\Delta t}. \quad (1.25)$$

Угол поворота $\Delta\phi$ измеряется в радианах, поэтому единица угловой скорости в СИ — радиан в секунду.

Выразив длину s дуги окружности через радиус R окружности и центральный угол $\Delta\phi$, можно установить связь между угловой ω и линейной v скоростями движения материальной точки по окружности и центростремительным ускорением:

$$s = R\Delta\phi, \quad v = \frac{s}{\Delta t} = \frac{R\Delta\phi}{\Delta t} = R\omega, \quad (1.26)$$

$$a = \frac{v^2}{R} = \omega^2 R. \quad (1.27)$$

Угловая скорость ω связана с частотой ν и периодом T вращения выражением

$$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}. \quad (1.28)$$

Вопросы

1. Что изучает механика? 2. Что изучает кинематика? 3. Что называют системой отсчета? 4. Какое движение называют поступательным? 5. При каких условиях тело можно считать материальной точкой? 6. Как определяют единицы длины и времени? 7. Каков физический смысл мгновенной скорости и мгновенного ускорения? 8. Какова связь между тангенциальным, нормальным и полным ускорением?

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1. Камень брошен с высоты h над поверхностью Земли с начальной скоростью $\vec{v}_0$ под углом α к горизонту. Определите зависимость координат тела от времени, время движения и дальность полета камня, максимальную высоту его подъема над поверхностью Земли. Напишите уравнение траектории. Сопротивлением воздуха пренебречь.

Решение. В качестве тела отсчета выберем Землю. Начало системы координат поместим в точку O , находящуюся на Земле. Ось OY направим вертикально вверх, а ось OX расположим так, чтобы вектор скорости $\vec{v}_0$ лежал в плоскости XOY (рис. 1.10). В этом случае движение будет происходить в указанной плоскости и для определения положения тела достаточно знать только две координаты — x и y . У поверхности Земли все тела движутся с постоянным ускорением $\vec{g}$, направленным вертикально вниз. Поэтому проекции ускорения камня во время всего его движения равны: $a_x = 0$; $a_y = -g$. За начало отсчета времени выберем момент бросания камня. Запишем начальные условия: $x_0 = 0$, $y_0 = h$, $v_{0x} = v_0 \cos \alpha$, $v_{0y} = v_0 \sin \alpha$.

Проекции скорости на оси координат и координаты камня в любой момент времени определяются из уравнений равноускоренного движения:

$$v_x = v_0 \cos \alpha, \quad (1)$$

$$v_y = v_0 \sin \alpha - gt, \quad (2)$$

$$x = v_0 t \cos \alpha, \quad (3)$$

$$y = h + v_0 t \sin \alpha - \frac{gt^2}{2}. \quad (4)$$

Найдем связь времени t с координатой x из уравнения (3)

($t = \frac{x}{v_0 \cos \alpha}$) и, подставив полученное выражение в уравнение (4), получим

$$y = h + x \operatorname{tg} \alpha - \frac{gx^2}{2v_0^2 \cos^2 \alpha}. \quad (5)$$

Выражение (5) является уравнением параболы. При заданном значении угла α — это парабола типа

$$y = ax^2 + bx + c.$$

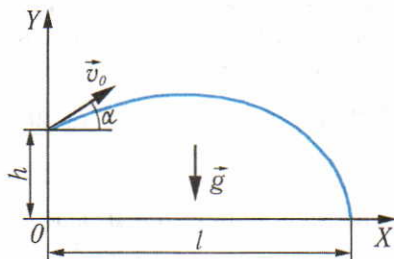


рис. 1.10

Время подъема камня определим, приравняв нулю проекцию скорости v_y в уравнении (2):

$$0 = v_0 \sin \alpha - g t_{\text{под}}, \\ t_{\text{под}} = \frac{v_0 \sin \alpha}{g}.$$

Подставляя полученное значение времени подъема камня в уравнение (4), найдем максимальную высоту подъема:

$$H = y_{\text{max}} = h + v_0 \sin \alpha \frac{v_0 \sin \alpha}{g} - \frac{g}{2} \left(\frac{v_0 \sin \alpha}{g} \right)^2 = h + \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{g} - \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g} = \\ = h + \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g}.$$

Время движения $t_{\text{дв}}$ определим, приравняв нулю координату y в уравнении (4):

$$0 = h + v_0 t_{\text{дв}} \sin \alpha - \frac{g t_{\text{дв}}^2}{2}.$$

Решив полученное уравнение относительно $t_{\text{дв}}$, получим

$$t_{\text{дв}} = \frac{v_0 \sin \alpha + \sqrt{v_0^2 \sin^2 \alpha + 2gh}}{g}.$$

Второй корень уравнения дает для времени движения отрицательное значение, что в данной задаче не имеет физического смысла.

Дальность полета камня l определяется из уравнения (3) при подстановке $t = t_{\text{дв}}$:

$$l = x_{\text{max}} = v_0 t_{\text{дв}} \cos \alpha = \frac{v_0^2 \sin \alpha \cos \alpha + v_0 \cos \alpha \sqrt{v_0^2 \sin^2 \alpha + 2gh}}{g}.$$

При $h=0$ получаем более простые уравнения:

$$x = v_0 t \cos \alpha, \quad y = v_0 t \sin \alpha - \frac{g t^2}{2}, \\ y = x \operatorname{tg} \alpha - \frac{g x^2}{2 v_0^2 \cos^2 \alpha}, \quad H = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g}, \\ t_{\text{дв}} = \frac{2 v_0 \sin \alpha}{g}, \quad l = \frac{v_0^2}{g} \sin 2\alpha.$$

Задача 2. Камень брошен вертикально вверх с поверхности Земли с начальной скоростью 30 м/с. Нарисуйте графики зависимости от времени скорости, ускорения, координаты камня и пройденного им пути за 8 с. Считать, что после падения камень не движется. Ускорение свободного падения принять равным 10 м/с. Сопротивлением воздуха пренебречь.

Решение. Когда говорят о графиках зависимости векторной величины от времени, например скорости или ускорения тела, то имеют в виду либо зависимость от времени проекции вектора на одну из координатных осей, либо зависимость от времени модуля вектора. Необходимо обратить внимание на то, что модуль любого вектора всегда величина положительная, а проекция вектора на координатную ось может приниматься положительной при направлении от начала координат и отрицательной при противоположном на-

правлении. При решении задачи за положительное направление оси OX выберем направление вектора начальной скорости $\vec{v}_0$ камня. В этом случае проекция a_x вектора ускорения свободного падения на ось OX равна: $a_x = -g = -10 \text{ м/с}^2$, а модуль ускорения равен: $a = g = 10 \text{ м/с}^2$.

Во время полета ни направление, ни модуль вектора ускорения свободного падения не изменяются, поэтому графики $a(t)$ и $a_x(t)$ до момента достижения земной поверхности являются прямыми, параллельными оси времени.

Зависимость проекции скорости на ось OX от времени можно представить в виде

$$v_x = v_0 - gt. \quad (1)$$

Так как полученная функция линейная, графиком этой функции является прямая. Ее можно построить по любым двум точкам. Выберем точку старта $t=0$, $v_x = v_0$ и верхнюю точку траектории $v_x = 0$, $t_{\text{под}} = v_0/g$. Отсюда время подъема камня до верхней точки равно: $t_{\text{под}} = 30/10 \text{ с} = 3 \text{ с}$.

Зависимость координаты x камня от времени при его движении запишем в виде $x = x_0 + v_0 t - gt^2/2$. Приняв за начало отсчета координаты положение камня на Земле ($x_0 = 0$), получим

$$x = v_0 t - gt^2/2. \quad (2)$$

В момент падения камня на Землю $x = 0$: $0 = v_0 t_{\text{дв}} - gt_{\text{дв}}^2/2$.

Следовательно, общее время полета равно: $t_{\text{дв}} = 2v_0/g$, $t_{\text{дв}} = 6 \text{ с}$.

Итак, мы выяснили, что общее время полета камня равно 6 с, а время подъема равно времени падения. В течение седьмой и восьмой секунд камень будет лежать на поверхности Земли. Построенные по этим результатам графики зависимости проекции ускорения a_x и модуля ускорения a от времени представлены на рисунке 1.11, а, б, графики зависимости проекции скорости v_x и модуля скорости v от времени представлены на рисунке 1.12, а, б.

Выражение (2) является квадратичной функцией, следовательно, графиком этой функции является парабола. Вершину параболы можно найти, подставив в выражение (2) время подъема камня $t_{\text{под}} = v_0/g$: $x_{\text{max}} = v_0^2/2g$; $x_{\text{max}} = 45 \text{ м}$.

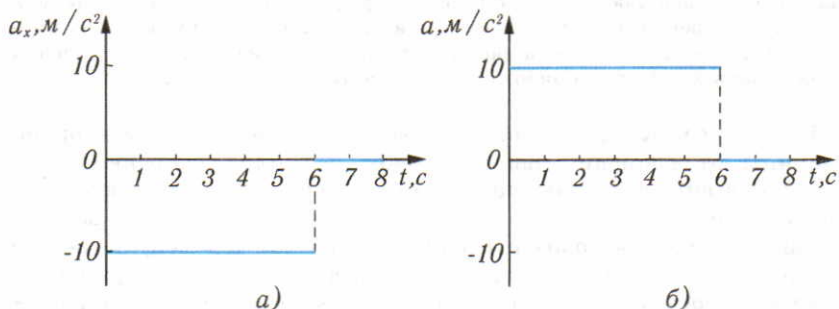


рис. 1.11

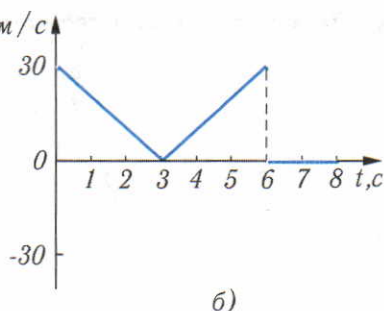
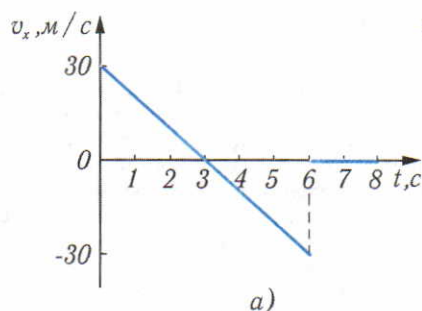


рис. 1.12

Для построения параболы заполним таблицу.

$t, \text{с}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8
$x, \text{м}$	0	25	40	45	40	25	0	0	0

График зависимости координаты x от времени представлен на рисунке 1.13, а. Для построения графика зависимости пройденного пути s от времени следует учесть, что в первые три секунды он совпадает с графиком $x(t)$, а с четвертой по шестую секунду длина пути продолжает увеличиваться по закону: $s = v_0^2/2g + g(t_{\text{под}} - 3)^2/2$.

Заполним таблицу зависимости пути от времени.

$t, \text{с}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8
$S, \text{м}$	0	25	40	45	50	65	90	90	90

График этой зависимости представлен на рисунке 1.13, б.

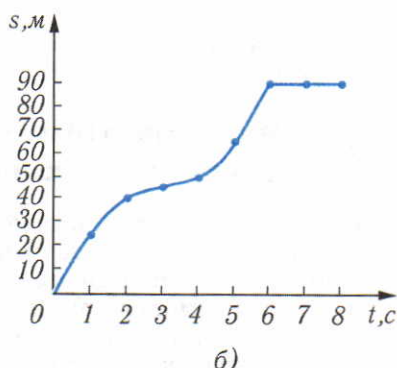
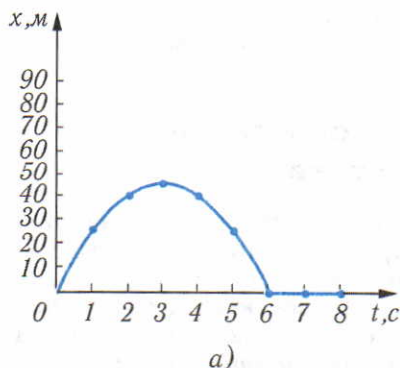


рис. 1.13

Задачи для самостоятельного решения

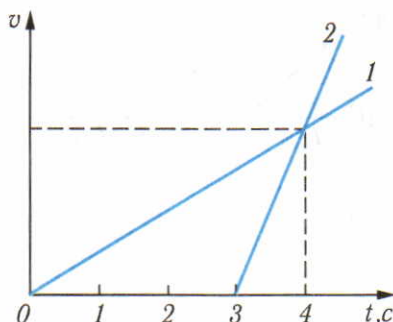


рис. 1.14

1.1. На рисунке 1.14 представлены графики зависимости скорости движения двух автомобилей от времени. Автомобили движутся по одной прямой в одном направлении и в начальный момент времени находились в одном и том же месте. Через сколько времени второй автомобиль догонит первый?

1.2. Найдите зависимость центростремительного ускорения точек земной поверхности от широты местности. Рассчитайте центростремительное ускорение для экватора, полюса и Москвы. При расчетах примите, что Земля имеет

форму шара радиусом 6400 км.

1.3. Самолет выполняет «мертвую петлю» в вертикальной плоскости, двигаясь с постоянной по модулю скоростью. Определите минимальную скорость движения самолета при радиусе «петли» 90 м и максимальный радиус «петли» при скорости движения самолета 100 м/с.

1.4. Мимо поста ГИБДД проезжает автомобиль со скоростью u , превышающей дозволённую. Инспектор ГИБДД на мотоцикле отправился вдогонку в тот момент, когда автомобиль поравнялся с постом ГИБДД. Считая движение мотоцикла равноускоренным, определите скорость v мотоцикла в тот момент, когда он догонит автомобиль.

1.5. Велосипедист едет по закруглению велотрека радиусом $R=35$ м. При движении с постоянным по модулю тангенциальным ускорением его скорость за 10 с увеличилась с 10 до 15 м/с. Определите тангенциальное, центростремительное и полное ускорения велосипедиста в конце 10-й секунды разгона.

1.6. Камень бросили под углом 60° к горизонту со скоростью 10 м/с. Рассчитайте радиус окружности, приближенно совпадающей с верхним участком траектории.

1.7. В последнюю секунду свободного падения тело прошло четвертую часть пути. Сколько времени и с какой высоты оно падало?

1.8. Колесо радиусом 1 м катится без проскальзывания по горизонтальной поверхности со скоростью 1 м/с. Определите зависимость координат точки, находящейся на ободе колеса, от времени. Начертите траекторию движения этой точки.

§ 2 Инвариантные и относительные величины в кинематике

В практике движение одного и того же тела рассматривают в разных системах отсчета, при этом кинематические характеристики движения при переходе из одной системы отсчета в другую могут изменяться или оставаться одинаковыми. Характеристики, имеющие одинаковые значения в разных системах отсчета, называют *инвариантными*. К инвариантным величинам относятся промежуток времени, дли-

на отрезка, стержня и т. п. Вывод об инвариантности этих величин сделан на основе обобщения опыта. В своей непосредственной практике человек чаще всего встречается с движением тел, скорости которых много меньше скорости света, поэтому вывод об инвариантности промежутков времени и отрезков в различных системах отсчета экспериментально проверен лишь для таких скоростей.

Величины, зависящие от выбора системы отсчета, в которой производится их измерение, называют *относительными*. Относительными величинами в кинематике являются координаты, перемещение, скорость, а иногда и ускорение. Относительна и траектория движущейся материальной точки. С изменением вида траектории при переходе из одной системы отсчета в другую мы встречаемся в ряде задач. Астрономы, например, хорошо знают, что такие планеты, как Марс, Сатурн, Юпитер, «выписывают» на небе сложные траектории с петлями. Между тем траектории их движения относительно Солнца — эллипсы. Все дело, оказывается, в том, что мы наблюдаем эти планеты в системе отсчета, связанной с Землей, которая сама движется по эллипсу относительно Солнца.

Относительность вида траектории можно продемонстрировать и в лаборатории. Отметим на ободе колеса тележки точку и будем наблюдать за ее перемещением при движении тележки. Ясно, что в системе отсчета, связанной с тележкой, траекторией точки будет окружность. В системе отсчета, связанной с Землей, траектория точки будет довольно сложной кривой. Эту кривую называют циклоидой.

С точки зрения кинематики все системы отсчета одинаково пригодны для описания движения тел. Это утверждение следует понимать в том смысле, что любое механическое явление можно описать в любой системе отсчета и при этом нет оснований отдавать предпочтение какой-либо одной системе отсчета перед другой. Ни одна из систем отсчета не является «истинной», «настоящей», выбор каждой из систем отсчета определяется лишь соображениями удобства, целесообразности.

По значениям кинематических величин в одной системе отсчета можно рассчитывать значения этих же величин в любой другой системе отсчета.

Типичным примером относительной величины в механике служит перемещение $\vec{s}$ тела. Если в движущемся поезде пассажир перейдет из одного конца вагона в другой, модуль его перемещения s' в системе отсчета, связанной с вагоном, будет равен нескольким метрам. В системе отсчета, связанной с Землей (рис. 1.15), перемещение $\vec{s}$ того же пассажира будет складываться из его перемещения $\vec{s}'$ относительно вагона и перемещения самого вагона относительно Земли $\vec{s}_0$:

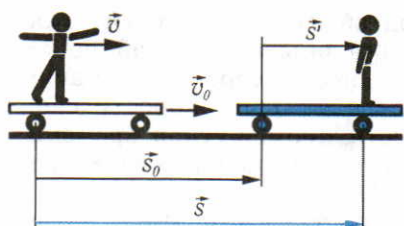


рис. 1.15

$$\vec{s} = \vec{s}' + \vec{s}_0. \quad (2.1)$$

В случае, когда одна система отсчета движется относительно другой с постоянной скоростью $\vec{v}_0$, это выражение принимает вид

$$\vec{s} = \vec{s}' + \vec{v}_0 \Delta t. \quad (2.2)$$

Разделив обе части уравнения (2.2) на одинаковый во всех системах отсчета малый промежуток времени Δt , получим

$$\frac{\Delta \vec{s}}{\Delta t} = \frac{\Delta \vec{s}'}{\Delta t} + \vec{v}_0.$$

При $\Delta t \rightarrow 0$ будем иметь

$$\vec{v} = \vec{v}' + \vec{v}_0. \quad (2.3)$$

Формула (2.3) представляет собой выражение *классического закона сложения скоростей*.

Классический закон сложения скоростей имеет ограниченную область применения. Он выполняется с высокой степенью точности при значениях скоростей v_0 и v' , много меньших скорости света c в вакууме, равной 300 000 км/с.

Автомобили и поезда, самолеты и космические ракеты, планеты и искусственные спутники Земли движутся относительно Земли со скоростями, значительно меньшими скорости света. Поэтому для описания их движения при переходе из системы отсчета, связанной с Землей, к любой другой системе отсчета, движущейся относительно Земли со скоростью $v \ll c$, можно пользоваться классическим законом сложения скоростей.

Особого обсуждения требует вопрос об ускорении в различных системах отсчета. Если рассматривать любые системы отсчета, движущиеся с ускорением друг относительно друга, то ускорение тела не является инвариантной величиной. Однако в системах отсчета, движущихся равномерно и прямолинейно относительно друг друга, ускорение тела одно и то же, т. е. инвариантно. К этому выводу легко прийти, используя классический закон сложения скоростей.

Пусть в одной системе отсчета за промежуток времени $\Delta t = t_2 - t_1$ скорость движения тела изменилась от $\vec{v}'_1$ до $\vec{v}'_2$. Скорости $\vec{v}'_1$ и $\vec{v}'_2$ этого же тела в моменты времени t_1 и t_2 в другой системе отсчета, движущейся со скоростью $\vec{v}_0 = \text{const}$ относительно первой, можно найти по закону сложения скоростей:

$$\vec{v}_1 = \vec{v}_1' + \vec{v}_0, \quad \vec{v}_2 = \vec{v}_2' + \vec{v}_0.$$

Вычтем одно равенство из другого. Изменения скорости в обеих системах отсчета оказываются одинаковыми:

$$\vec{v}_2 - \vec{v}_1 = \vec{v}_2' - \vec{v}_1',$$

или $\Delta \vec{v} = \Delta \vec{v}'$.

Разделив обе части равенства на промежуток времени Δt , в течение которого произошло изменение скорости движения тела на $\Delta \vec{v}$, получим

$$\frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{\Delta \vec{v}'}{\Delta t}.$$

В пределе, при $\Delta t \rightarrow 0$, будем иметь $\vec{a} = \vec{a}'$, т. е. ускорение тела одно и то же в обеих системах отсчета.

Вопросы

1. Какие кинематические величины имеют одинаковые значения в различных системах отсчета? 2. Какие кинематические величины зависят от выбора системы отсчета? 3. Приведите примеры, иллюстрирующие относительность траектории. 4. Инвариантно ли ускорение тела в системах отсчета, движущихся равномерно и прямолинейно относительно друг друга? 5. При каких условиях применим классический закон сложения скоростей?

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1. Два автомобиля приближаются к перекрестку по взаимно перпендикулярным траекториям с постоянными скоростями v_1 и v_2 . В момент времени, когда первый автомобиль достиг перекрестка, второй находился на расстоянии l_0 от него. Определите минимальное расстояние между автомобилями в процессе движения.

Решение. *Первый способ.* В качестве тела отсчета выберем Землю. Движение автомобилей по поверхности Земли на малых по сравнению с радиусом Земли расстояниях можно считать происходящим на плоскости. В этом случае положение каждого из них можно задать двумя координатами. Оси OX и OY направим вдоль дорог в направлении движения автомобилей (рис. 1.16). За начало отсчета расстояний выберем перекресток, за начало отсчета времени — момент времени пересечения перекрестка первой машиной.

Начальные условия движения автомобилей запишем в виде

$$\begin{aligned} v_{1x} &= 0, & v_{1y} &= v_1, & x_{01} &= 0, & y_{01} &= 0, \\ v_{2x} &= v_2, & v_{2y} &= 0, & x_{02} &= -l_0, & y_{02} &= 0. \end{aligned}$$

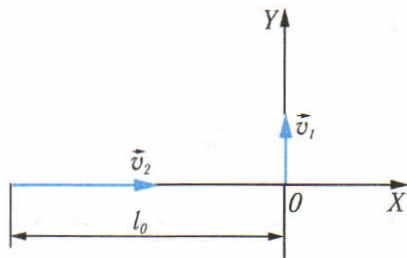


рис. 1.16

Координаты машин в любой произвольный момент времени определяются уравнениями

$$\begin{aligned}x_1 &= x_{01} + v_{1x}t, & y_1 &= y_{01} + v_{1y}t, \\x_2 &= x_{02} + v_{2x}t, & y_2 &= y_{02} + v_{2y}t.\end{aligned}$$

С учетом начальных условий получим

$$x_1 = 0, \quad x_2 = -l_0 + v_2t, \quad y_1 = v_1t, \quad y_2 = 0.$$

Расстояние между точками на плоскости можно выразить через их координаты: $l = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$.

Отсюда расстояние l между автомобилями в любой момент времени равно: $l = \sqrt{(l_0 - v_2t)^2 + v_1^2t^2}$.

Исследование этого выражения на минимум можно провести следующим элементарным способом. Возведем обе его части в квадрат:

$$l^2 = (l_0 - v_2t)^2 + v_1^2t^2, \quad (v_1^2 + v_2^2)t^2 - 2l_0v_2t + (l_0^2 - l^2) = 0.$$

Полученное выражение является уравнением параболы. Из него следует, что на расстоянии l автомобили будут дважды: в моменты времени t_1 и t_2 , определяемые формулой

$$t_{1,2} = \frac{l_0v_2 \pm \sqrt{l_0^2v_2^2 - (v_1^2 + v_2^2)(l_0^2 - l^2)}}{v_1^2 + v_2^2}.$$

Минимальное значение $l_{\min}$ достигается в случае $t_1 = t_2 = \frac{l_0v_2}{v_1^2 + v_2^2}$, т. е. при обращении в нуль подкоренного выражения (дискриминанта): $l_0^2v_2^2 - (v_1^2 + v_2^2)(l_0^2 - l_{\min}^2) = 0$.

Выразив из этого уравнения $l_{\min}$, получим $l_{\min} = \frac{v_1l_0}{\sqrt{v_1^2 + v_2^2}}$.

Решение задачи оказывается более простым, если выбрать другую систему отсчета.

Второй способ. В качестве тела отсчета выберем второй автомобиль, направление координатных осей и начальный момент отсчета времени примем такими же, как и в первом случае. В системе отсчета, связанной со вторым автомобилем, первый автомобиль движется со скоростью $\vec{v}_{12}$, равной: $\vec{v}_{12} = \vec{v}_1 - \vec{v}_2$, $v_{12} = \sqrt{v_1^2 + v_2^2}$. Вектор скорости $\vec{v}_{12}$ направлен под углом α к прямой, соединяющей автомобили в начальный момент времени $t = 0$ (рис. 1.17).

Кратчайшее расстояние между автомобилями равно длине отрезка перпендикуляра, опущенного из начала координат, в котором находится второй автомобиль, на прямую, по которой движется первый автомобиль. Из рисунка 1.17 видно, что $l_{\min} = l_0 \sin \alpha$, где $\sin \alpha = \frac{v_1}{v_{12}}$.

Следовательно,

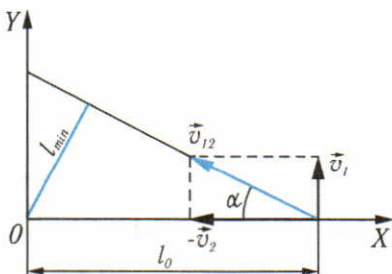


рис. 1.17

$$l_{\min} = \frac{l_0 v_1}{\sqrt{v_1^2 + v_2^2}}.$$

Задача 2. Рассчитайте радиус $R_{\text{ок}}$ окружности, совпадающей с участком траектории точки колеса радиусом R (циклоиды) в ее верхней точке.

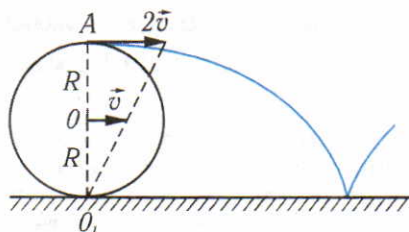


рис. 1.18

Решение. Ускорение точки A (рис. 1.18) инвариантно в движущихся с постоянной скоростью относительно друг друга системах отсчета; относительно системы отсчета, связанной с осью колеса, оно равно $a_{\text{цс1}} = \frac{v_1^2}{R}$, а относительно Земли $a_{\text{цс2}} = \frac{v_2^2}{R_{\text{ок}}}$, где v_1 — скорость этой точки относительно центра колеса O ; v_2 — скорость этой же точки относительно точки O_1 .

Обозначив буквой v скорость движения центра колеса O , получим: $v_2 = 2v$. В соответствии с законом сложения скоростей $v_1 = 2v - v = v$.

Из инвариантности ускорений ($a_{\text{цс1}} = a_{\text{цс2}}$) следует: $\frac{v^2}{R} = \frac{(2v)^2}{R_{\text{ок}}}$, откуда $R_{\text{ок}} = 4R$.

■ ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

2.1. Ракета на высоте 100 м разрывается в воздухе на два осколка. Скорость первого осколка равна 60 м/с и направлена вертикально вверх, скорость второго равна 40 м/с и направлена вертикально вниз. На каком расстоянии друг от друга окажутся осколки через 0,5 с?

2.2. Два камня падают с высоты 80 м, причем второй камень начал падать на 2 с позже первого. Постройте график зависимости проекции скорости первого камня на вертикальную ось в системе отсчета, связанной со вторым камнем. Ускорение свободного падения примите равным 10 м/с².

2.3. Пловец переплывает реку шириной l . Под каким углом к направлению вектора скорости течения воды он должен плыть, чтобы попасть на противоположный берег за самое короткое время? Чему равно перемещение пловца относительно берега, если скорость течения реки v_1 , а скорость пловца относительно воды v_2 ?

2.4. Ракета стартовала с поверхности Земли и двигалась вертикально вверх с ускорением 5 м/с² в течение 10 с, пока работали ее двигатели. Сколько времени пройдет с момента прекращения работы двигателей до момента падения ракеты на Землю? Сопротивлением воздуха пренебречь.

2.5. Два автомобиля за одинаковое время набрали одинаковую скорость. Первый автомобиль двигался в течение времени t_1 с ускорением a_1 , а затем в течение времени t_2 с ускорением a_2 . Второй автомобиль двигался в течение времени t_2 с ускорением a_2 , а затем в течение времени t_1 с ускорением a_1 . В каком случае перемещение тела будет больше, если $a_1 > a_2$? Решите задачу в общем случае.

Проверьте свое решение для частного случая: $t_1 = 5$ с, $a_1 = 2$ м/с², $t_2 = 10$ с, $a_2 = 1$ м/с².

§ 3 Основные понятия и законы динамики

В кинематике движение тел изучается без выяснения законов взаимодействия тел и причин возникновения ускорений. Раздел механики, изучающий законы взаимодействия тел и законы движения тел при действии на них других тел, называется *динамикой*.

Первый закон Ньютона. Развитие механики как экспериментальной науки началось в XVII в. Великий итальянский ученый Галилео Галилей (1564—1642) на основе экспериментальных исследований движения шаров по наклонной плоскости сделал общий вывод о том, что скорость любого тела изменяется только в результате его *взаимодействия* с другими телами. Явление сохранения скорости движения тела при отсутствии внешних воздействий называется *инерцией*.

Великий английский ученый Исаак Ньютон (1643—1727) сформулировал в качестве одного из основных законов механики *закон инерции*: всякое тело находится в покое или движется равномерно и прямолинейно, если на него не действуют другие тела. Закон инерции называют *первым законом Ньютона* или *первым законом механики*.

Свойство тел сохранять свое состояние покоя или движения с постоянной скоростью называется *инертностью тел*. Инертность проявляется в том, что при внешнем воздействии тело не может мгновенно перейти из состояния покоя в состояние движения или из состояния движения в состояние покоя. Легко изменить скорость движения воздушного шарика, но трудно изменить скорость автобуса. Следовательно, инертность разных тел может быть различной.

Масса. Для количественного сравнения инертности разных тел в физике используется физическая величина — *масса* тела. Масса является мерой инертности тела.

Для сравнения масс различных тел необходимо выбрать тело, масса которого принимается за единицу массы. Таким телом служит эталон из сплава иридия с платиной, хранящийся в Международном бюро мер и весов (Франция). Единица массы в Международной системе, равная массе этого эталона, называется килограмм (кг).

На практике для измерения масс тел используется связь свойства инертности тел со свойством их притяжения к Земле. Опыты и наблюдения показывают, что, чем более инертно тело, тем сильнее оно притягивается к Земле. Притяжение тел к Земле называется *гравитационным притяжением*. Следовательно, масса является не только мерой инертности тел, но и мерой их способности к гравитационному взаимо-

действию. Самый простой и распространенный способ сравнения и измерения масс тел основан на сравнении способности тел к гравитационному притяжению с помощью равноплечих весов. Если равноплечие весы, на чашки которых помещены два тела, находятся в равновесии, то гравитационное притяжение тел к Земле одинаково, следовательно, одинаковы и массы тел.

Инерциальные системы отсчета. При отсутствии взаимодействий с другими телами одно и то же тело может находиться в состоянии покоя в одной системе отсчета и двигаться с ускорением в другой системе отсчета. Следовательно, закон инерции выполняется не в любых системах отсчета. Системы отсчета, в которых выполняется закон инерции, называются *инерциальными системами отсчета*.

Сила. В инерциальных системах отсчета любое изменение скорости тела происходит только в результате действия на него других тел. Признаком действия на тело других тел является возникновение ускорения. Однако одного ускорения для характеристики действия одного тела на другое оказывается недостаточно. Опыт показывает, что при одинаковом действии разные тела приобретают различные ускорения. Однако произведение массы тела на его ускорение при одинаковом действии на разные тела оказывается одинаковым и поэтому может служить количественной мерой действия на тело других тел.

Физическая величина $\vec{F}$, равная произведению массы m тела на ускорение $\vec{a}$ его движения, называется *силой*:

$$\vec{F} = m\vec{a}. \quad (3.1)$$

Из определения понятия силы следует, что сила $\vec{F}$ есть векторная величина. Направление вектора силы $\vec{F}$ совпадает с направлением вектора ускорения $\vec{a}$ тела.

За единицу силы в Международной системе принимается сила, которая телу массой 1 кг сообщает ускорение 1 м/с². Эта единица называется ньютоном (Н).

Силы упругости. Возникновение ускорений является не единственным возможным результатом взаимодействия тел. Опыт показывает, что другим возможным результатом взаимодействия тел может быть изменение формы и размеров тел — *деформация тел*. Поэтому силы можно определять не только путем измерения ускорений тел известной массы, но и путем измерения деформации тел. Силы, возникающие в результате деформации тел, называются *силами упругости*.

Измерение сил, возникающих при деформации тел, можно производить, используя силу тяжести. Так как ускорение $\vec{g}$ свободного падения тел под действием силы тяжести известно, сила тяжести $\vec{F}$ равна:

$$\vec{F} = m\vec{g}.$$

Подвесивая к концу пружины тела разной массы, можно исследовать зависимость силы упругости $F_{\text{упр}}$ от деформации x . Как показывает опыт, при малых деформациях стальной пружины сила упругости $F_{\text{упр}}$ прямо пропорциональна деформации (*закон Гука*):

$$F_{\text{упр}} = -kx. \quad (3.2)$$

Коэффициент k в формуле (3.2) называется *жесткостью* и выражается в ньютонах на метр (Н/м). Знак «минус» в законе Гука указывает, что сила упругости направлена противоположно деформации тела.

Сложение сил. Сила $\vec{F}$, оказывающая на тело такое же действие, как две одновременно действующие на это тело силы $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$, называется *равнодействующей сил* $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$.

Опыт показывает, что равнодействующую $\vec{F}$ двух сил $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$, приложенных к одной точке тела, можно найти по правилу сложения векторов, или по правилу параллелограмма:

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2. \quad (3.3)$$

Пользуясь правилом параллелограмма, любой вектор силы $\vec{F}$ можно представить как равнодействующую двух векторов сил $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$, приложенных к той же точке тела. При взаимодействии одного тела одновременно с несколькими телами каждое из тел действует независимо от других тел и равнодействующая сила $\vec{F}$ является суммой векторов всех действующих сил:

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots + \vec{F}_n.$$

Это экспериментально установленное свойство сил называют подчинением принципу суперпозиции.

Второй закон Ньютона. По определению сила $\vec{F}$, приложенная к телу, равна произведению массы m тела на ускорение $\vec{a}$, возникающее под действием этой силы. Следовательно, ускорение движения тела прямо пропорционально приложенной к нему силе и обратно пропорционально массе тела. Это утверждение называется *вторым законом Ньютона* или *вторым законом механики*:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}. \quad (3.4)$$

В случае, если к телу приложено несколько сил, ускорение $\vec{a}$ тела прямо пропорционально равнодействующей $\vec{F}_p$ всех сил и обратно пропорционально массе m тела:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_p}{m}. \quad (3.5)$$

Второй закон механики выполняется только в инерциальных системах отсчета.

Закон инерции не является простым следствием второго закона механики. Определяя понятие инерциальной системы отсчета, он позволяет установить границы применимости второго закона механики.

Третий закон Ньютона. Опыт показывает, что при любом взаимодействии двух тел, массы которых равны m_1 и m_2 , отношение модулей их ускорений остается постоянным и равным обратному отношению масс тел:

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{m_2}{m_1}.$$

Отсюда следует равенство $a_1 m_1 = a_2 m_2$.

В векторном виде это уравнение следует записать в виде

$$m_1 \vec{a}_1 = -m_2 \vec{a}_2.$$

Знак «минус» выражает тот опытный факт, что при взаимодействии тел их ускорения всегда имеют противоположные направления.

Используя второй закон Ньютона, получаем равенство

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2.$$

Это выражение, называемое *третьим законом Ньютона*, показывает, что тела действуют друг на друга с силами, направленными вдоль одной прямой. Эти силы равны по модулю, противоположны по направлению. Однако они не могут уравновешивать друг друга, так как приложены к разным телам. Сила действия и сила противодействия имеют одинаковую природу.

Третий закон Ньютона выполняется только в инерциальных системах отсчета.

■ Вопросы

1. Сформулируйте первый закон Ньютона.
2. Какие системы отсчета в классической механике называют инерциальными?
3. Существуют ли в природе инерциальные системы отсчета?
4. Как в инерциальной системе отсчета движется тело, если векторная сумма всех сил, действующих на него, равна нулю?
5. Как в инерциальной системе отсчета движется тело, если векторная сумма всех сил, действующих на него, не равна нулю?
6. Какая физическая величина является мерой инертности тела?
7. Какая физическая величина является мерой действия на тело других тел?
8. Как зависит сила упругости от деформации тела?
9. Сформулируйте второй закон Ньютона.
10. Как следует записать второй закон Ньютона для тела, на которое действуют несколько сил?
11. В чем сущность принципа суперпозиции сил?
12. Всегда ли совпадает направление равнодействующей всех сил с направлением вектора скорости этого тела?
13. Всегда ли совпадает направление равнодействующей всех сил с направлением вектора ускорения этого тела?
14. Сформулируйте третий закон Ньютона.
15. Поясните примерами особенности сил действия и противодействия.

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1. Два тела массами m_1 и m_2 , связанные нитью, лежат на гладкой горизонтальной поверхности. Масса нити m_0 . На второе тело действует в горизонтальном направлении сила $\vec{F}$. Определите силы, с которыми нить действует на каждое тело. В каком случае эти силы будут равны по модулю? Трением можно пренебречь.

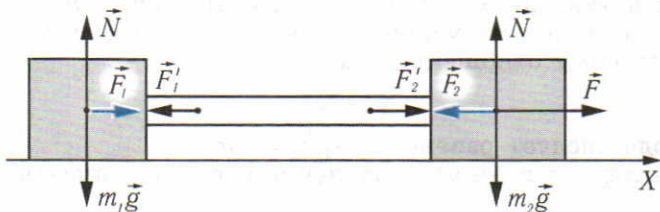


рис. 1.19

Решение. Изобразим силы, действующие на каждое тело и нить (рис. 1.19): $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ — силы, с которыми нить действует на тела 1 и 2; $\vec{F}_1'$ и $\vec{F}_2'$ — силы, с которыми тела действуют на нить.

Сила тяжести, действующая на каждое тело, скомпенсирована силами реакции опоры.

Так как нить нерастяжима, то модули ускорений обоих тел и нити одинаковы и равны a . Применим второй закон Ньютона для сил, действующих в горизонтальном направлении (сумма сил, действующих в вертикальном направлении, равна нулю):

$$F_1 = m_1 a, \quad (1)$$

$$F_2' - F_1' = m_0 a, \quad (2)$$

$$F - F_2 = m_2 a. \quad (3)$$

Применив третий закон Ньютона, получим:

$$F_1' = F_1, \quad F_2' = F_2. \quad (4)$$

Используя выражения (1) — (4), получаем:

$$a = \frac{F}{m_1 + m_2 + m_0},$$

$$F_1 = \frac{F m_1}{m_1 + m_2 + m_0},$$

$$F_2 = \frac{F(m_1 + m_0)}{m_1 + m_2 + m_0}.$$

Силы $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ равны по модулю в том случае, когда масса нити равна нулю (когда массой нити можно пренебречь по сравнению с массами тел).

Задача 2. Длинная доска массой M лежит на гладком горизонтальном столе. На доске находится брусок массой m . Коэффициент трения между бруском и доской равен μ . К бруску приложена сила, параллельная доске, ее модуль зависит от времени по закону $F = at$. Исследуйте зависимость проекций ускорений бруска и доски на горизонтальную ось от времени действия силы. Начертите графики этих зависимостей.

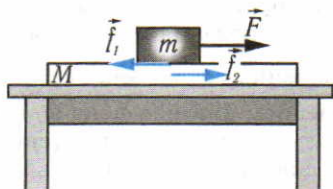


рис. 1.20

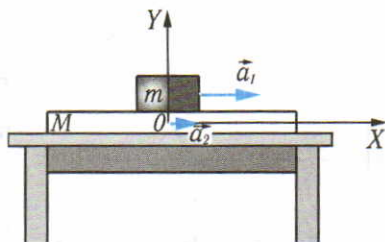


рис. 1.21

Решение. Относительно инерциальной системы отсчета, связанной с Землей, на брусок действуют две силы: внешняя сила $\vec{F}$ и сила трения $\vec{f}_1$ со стороны доски, направленная в сторону, противоположную направлению внешней силы $\vec{F}$. На доску действует только одна неуравновешенная сила $\vec{f}_2$ — сила трения со стороны бруска (рис. 1.20). Силы тяжести, действующие на доску и брусок, уравновешиваются упругими силами реакции опор.

Уравнения второго закона Ньютона в проекции на ось OX , направленную параллельно вектору силы $\vec{F}$ (рис. 1.21), можно записать в виде $F_x + f_{1x} = ma_{1x}$, $f_{2x} = Ma_{2x}$, где $F_x = F$, $f_{1x} = -f$, $f_{2x} = f$.

Следовательно, $F - f = ma_{1x}$, $f = Ma_{2x}$.

Эти уравнения имеют смысл только при значениях $a_{1x} \geq a_{2x}$, так как по условию задачи доска не может двигаться быстрее бруска.

В начале движения ускорения бруска и доски равны между собой: $a_{1x} = a_{2x}$, откуда

$$\frac{F - f}{m} = \frac{f}{M}.$$

Эти ускорения будут нарастать со временем до тех пор, пока брусок не станет скользить по доске. Обозначим этот момент времени через t_0 . Предельное значение силы F_0 , при котором ускорения доски и бруска еще равны, можно определить из условия

$$\frac{F_0 - f_0}{m} = \frac{f_0}{M},$$

где $f_0 = \mu mg$ — максимальное значение силы трения покоя, равное силе трения скольжения.

Итак,

$$\frac{F_0 - \mu mg}{m} = \frac{\mu mg}{M}, \quad F_0 = \mu mg \left(1 + \frac{m}{M} \right).$$

Если $F \leq F_0$, то $a_{1x} = a_{2x} = \frac{F}{m + M}$.

Таким образом, до момента времени t_0 , равного

$$t_0 = \frac{F_0}{\alpha} = \frac{\mu mg}{\alpha} \left(1 + \frac{m}{M} \right),$$

проекции ускорения обоих тел одинаковы и растут по линейному закону:

$$a = a_{1x} = a_{2x} = \frac{F}{m + M} = \frac{\alpha t}{m + M}.$$

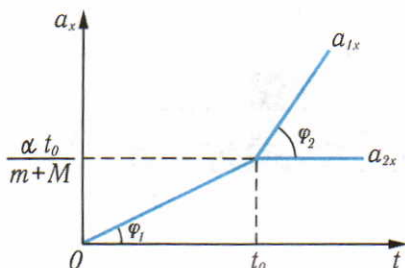


рис. 1.22

При $t > t_0$ проекции ускорения доски и бруска будут разными. Проекция ускорения доски, достигнув значения $a_{2x} = \frac{\mu mg}{M}$, останется с течением времени неизменной, в то время как проекция ускорения бруска будет увеличиваться со временем по закону:

$$a_{1x} = \frac{\alpha t - \mu mg}{m} = \frac{\alpha t}{m} - \mu g.$$

Графически зависимости ускорений бруска и доски от времени показаны на рисунке 1.22.

Задача 3. Брусок массой $m_1 = 0,30$ кг лежит на наклонной плоскости, угол при основании которой равен 30° . Коэффициент трения бруска о плоскость равен 0,2. К бруску привязана невесомая и нерастяжимая нить, другой конец которой перекинут через неподвижный блок. К этому концу нити прикреплен груз. Определите ускорения бруска при значениях массы m_2 груза 0,05 кг; 0,15 кг; 0,25 кг. При каких значениях массы груза брусок покоится?

Решение. В зависимости от соотношения между величинами m_1 , m_2 , α и μ брусок может двигаться с ускорением вверх или вниз по наклонной плоскости или находиться в покое. При этом изменяется не только направление, но и модуль силы трения, так как сила трения может принимать различные значения.

Рассмотрим два предельных случая, когда брусок движется ускоренно вверх и ускоренно вниз по наклонной плоскости. На рисунке 1.23, а, б изображены силы, действующие на брусок и груз: $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ — силы натяжения нити при ускоренном движении грузов соответственно вверх или вниз по наклонной плоскости; $\vec{N}$ — сила нормального давления; $m_1 \vec{g}$ и $m_2 \vec{g}$ — силы тяжести, действующие на брусок и груз; $\vec{F}_{\text{тр}}$ — сила трения скольжения.

Сила трения скольжения в каждом случае направлена в сторону, противоположную движению бруска. Так как нить нерастяжима, то

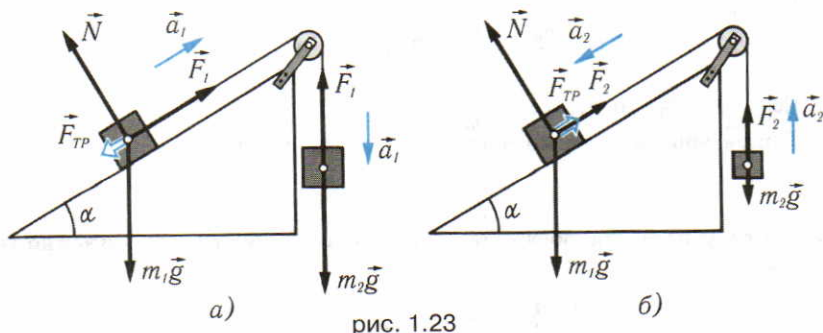


рис. 1.23

модули ускорений, с которыми движутся брусок и груз, одинаковы. Вследствие невесомости нити сила натяжения по всей ее длине одинакова.

1. Запишем второй закон Ньютона для проекций сил и ускорений на ось, совпадающую по направлению с ускорением, для случая, изображенного на рисунке 1.23, а:

$$F_1 - m_1 g \sin \alpha - F_{\text{тр}} = m_1 a_1, \quad (1)$$

$$m_2 g - F_1 = m_2 a_1. \quad (2)$$

Учитывая, что сила трения скольжения $F_{\text{тр}} = \mu N$, где $N = m_1 g \cos \alpha$, получим

$$F_{\text{тр}} = \mu m_1 g \cos \alpha. \quad (3)$$

Складывая уравнения (1) и (2) и заменяя значение силы трения выражением (3), получим

$$m_2 g - m_1 g \sin \alpha - \mu m_1 g \cos \alpha = (m_1 + m_2) a_1. \quad (4)$$

Это выражение можно использовать для расчета ускорения бруска только при условии, что $a_1 \geq 0$.

Определим минимальную массу груза m'_2 , при которой брусок еще движется вверх по наклонной плоскости без ускорения ($a = 0$):

$$m'_2 g - m_1 g \sin \alpha - \mu m_1 g \cos \alpha = 0, \quad m'_2 = m_1 (\sin \alpha + \mu \cos \alpha). \quad (5)$$

Следовательно, при выполнении условия $m_2 \geq m_1 (\sin \alpha + \mu \cos \alpha)$ можно определить искомое ускорение бруска из уравнения (4):

$$a_1 = g \frac{m_2 - m_1 \sin \alpha - \mu m_1 \cos \alpha}{m_1 + m_2}. \quad (6)$$

Рассчитаем числовое значение величины m'_2 : $m'_2 = 0,30 \text{ кг} \times (\sin 30^\circ + 0,20 \cos 30^\circ) = 0,20 \text{ кг}$. Сравнивая полученное значение с данными, представленными в условии, делаем вывод, что рассчитать ускорение бруска по формуле (6) можно лишь при значении $m_2 \geq 0,20 \text{ кг}$. Положим, $m = 0,25 \text{ кг}$:

$$a_1 = 9,81 \text{ м/с}^2 \cdot \frac{0,25 - 0,30 \cdot 0,5 - 0,20 \cdot 0,30 \cdot \sqrt{3}/2}{0,30 + 0,25} = 0,86 \text{ м/с}^2.$$

2. Запишем второй закон Ньютона для проекции сил и ускорений на ось, направление которой совпадает с направлением ускорения, для случая, изображенного на рисунке 1.23, б:

$$m_1 g \sin \alpha - F_2 - F_{\text{тр}} = m_1 a_2, \quad (7)$$

$$F_2 - m_2 g = m_2 a_2. \quad (8)$$

Учитывая, что сила трения скольжения равна $F_{\text{тр}} = \mu m_1 g \cos \alpha$, получим, сложив оба уравнения:

$$m_1 g \sin \alpha - m_2 g - \mu m_1 g \cos \alpha = (m_1 + m_2) a_2. \quad (9)$$

Полученное выражение можно использовать для расчета ускорения бруска только при условии, что $a_2 \geq 0$.

Определим максимальную массу груза m''_2 , при которой брусок еще движется вниз по наклонной плоскости без ускорения ($a = 0$):

$$m_1 g \sin \alpha - m_2'' g - \mu m_1 g \cos \alpha = 0, \\ m_2'' = m_1 (\sin \alpha - \mu \cos \alpha). \quad (10)$$

Следовательно, при выполнении условия $m_2 \leq m_1 (\sin \alpha - \mu \cos \alpha)$ можно определить ускорение бруска из уравнения (9):

$$a_2 = g \frac{m_1 \sin \alpha - m_2 - \mu m_1 \cos \alpha}{m_1 + m_2}. \quad (11)$$

Рассчитаем числовое значение величины m_2'' :

$$m_2'' = 0,30 \text{ кг} (\sin 30^\circ - 0,20 \cos 30^\circ) = 0,10 \text{ кг}.$$

Сравнивая полученное значение с данными, представленными в условии, делаем вывод, что рассчитать ускорение бруска по формуле (11) можно лишь при значении $m_2 = 0,05 \text{ кг}$, так как $m_2 < m_2''$:

$$a_2 = 9,81 \text{ м/с}^2 \cdot \frac{0,30 \cdot 0,50 - 0,05 - 0,20 \cdot 0,30 \cdot \sqrt{3}/2}{0,05 + 0,30} = 1,4 \text{ м/с}^2.$$

3. При выполнении условия

$$m_1 (\sin \alpha + \mu \cos \alpha) > m_2 > m_1 (\sin \alpha - \mu \cos \alpha)$$

брусок не будет двигаться ни вниз, ни вверх по наклонной плоскости, т. е. будет находиться в покое.

Для конкретных чисел, заданных в условии, будем иметь

$$0,20 \text{ кг} > m_2 > 0,10 \text{ кг}.$$

Следовательно, при $m_2 = 0,15 \text{ кг}$ брусок будет покоиться.

В чем же причина того, что система покоится не при одном значении массы груза m_2 , а в интервале значений примерно от 0,2 до 0,1 кг? Оказывается, причина состоит в особенности силы трения покоя, заключающейся в том, что она может изменяться при изменении внешней силы, действующей на тело.

■ Задачи для самостоятельного решения

3.1. Грузы массами 1,0 и 1,5 кг связаны невесомой и нерастяжимой нитью. Нить перекинута через неподвижный блок. Найдите силу давления нити на ось блока, если силой трения между нитью и блоком, а также его массой можно пренебречь.

3.2. Брусок массой 0,3 кг лежит на наклонной плоскости, угол при основании которой составляет $\alpha = 30^\circ$. Коэффициент трения бруска о плоскость равен 0,2. К бруску привязана нить, другой конец которой перекинут через неподвижный блок. К этому концу нити прикреплен груз массой 0,2 кг. Определите ускорение тел и силу упругости нити.

3.3. На наклонной плоскости лежит брусок. Начертите график зависимости ускорения бруска от угла наклона плоскости к горизонту для $\mu = 0,6$.

3.4. Силой, движущей поезд, является сила трения колес тепловоза о рельсы. Тормозит же движение сила трения колес вагонов о рельсы. Поскольку масса вагонов больше массы тепловоза, а коэффициент трения колес о рельсы одинаков, следует вывод: тепловоз не сдвинет состав. Найдите ошибку в рассуждениях.

3.5. Сани начинают двигаться по горизонтальной поверхности со скоростью 10 м/с. Коэффициент трения μ между полозьями саней и дорогой равен 0,1. Какой путь пройдут сани за 15 с?

3.6. Сани из состояния покоя съезжают со склона горы длиной 50 м за 5 с. Определите коэффициент трения скольжения саней о поверхность горы, если склон горы с горизонтом составляет угол $\alpha = 30^\circ$.

3.7. Сани массой $m = 50$ кг перемещаются по горизонтальной поверхности под воздействием силы $F = 200$ Н, направленной под углом $\alpha = 30^\circ$ к горизонту. Чему равно ускорение движения саней в момент начала движения, если коэффициент трения саней о снежный наст равен $\mu = 0,1$?

3.8. На горизонтальную поверхность стола вертикально падает быстро вращающийся цилиндр. Чему равен угол между направлением отскока и нормалью к горизонтальной поверхности, если коэффициент трения скольжения цилиндра о поверхность равен μ ?

§ 4 Прямая и обратная задачи механики

Прямая задача механики материальной точки. Основная задача механики — определение координат тела известной массы и его скорости в любой момент времени по силам, действующим на тело, и по известным начальным условиям.

Эту задачу называют *прямой задачей механики*. Для ее решения необходимо знать координаты и скорость тела в некоторый начальный момент времени. Силы в механике зависят от координат или скорости движения одного тела относительно другого. Для нахождения координат тела в любой момент времени необходимо по известным значениям сил, действующих на тело в данный момент, и известной массе тела определить его ускорение, затем найти новое значение скорости тела, его перемещение и координаты.

Таким образом, решение основной задачи механики проводится по следующей схеме:

— в соответствии с первым законом Ньютона выбирается наиболее удобная инерциальная система отсчета;

— в соответствии с принципом суперпозиции находится векторная сумма сил $\Sigma \vec{F}$, действующих на тело, или записываются проекции сил на координатные оси;

— в соответствии со вторым законом Ньютона определяется ускорение тела в данной системе отсчета:

$$\vec{a} = \frac{\Sigma \vec{F}}{m}, \text{ или } a_x = \frac{F_x}{m}, a_y = \frac{F_y}{m}, a_z = \frac{F_z}{m};$$

— по ускорениям и начальным условиям находят скорости и координаты материальной точки в любой момент времени.

Прямая задача механики легко решается в случае движения тел под действием постоянной силы. При движении тел у поверхности Земли силу тяжести, действующую на тела, можно считать постоянной. Следовательно, во время всего полета тело, брошенное под углом α к горизонту, движется

с постоянным ускорением, равным ускорению свободного падения $\vec{g}$. Это дает возможность, зная начальные условия (координаты и скорость), рассчитать высоту и дальность полета и результаты расчета проверить экспериментально. В случае действия сил, зависящих от координат, расчет движения тел оказывается более сложной задачей.

Прямую задачу механики часто приходится решать инженерам. Например, зная гравитационные силы, действующие со стороны планет на космический корабль, можно рассчитывать его траекторию в космическом пространстве. Зная силу взаимодействия гребного винта с водой и силу сопротивления воды движению корпуса судна, можно определить, как будет двигаться судно, какую скорость оно может развить.

Обратная задача механики. При исследовании новых физических явлений и взаимодействий часто приходится решать *обратную задачу механики*: зная, как движется тело, определять действующие на него силы.

Именно путем решения обратной задачи механики установлены многие фундаментальные законы природы, открыты действующие в природе силы.

Открытие закона всемирного тяготения. Примером решения обратной задачи механики является открытие закона всемирного тяготения.

В XVI в. астроном Тихо Браге, в течение многих лет наблюдавший планеты, смог с наибольшей возможной в то время точностью определить их координаты в различные моменты времени. Обработывая результаты наблюдений Тихо Браге, астроном Иоганн Кеплер установил формы орбит — траекторий, по которым движутся планеты, и некоторые особенности движения планет по этим орбитам.

Оказалось, что планеты движутся по орбитам, близким к круговым, и отношение куба радиуса орбиты любой планеты к квадрату периода ее обращения вокруг Солнца есть величина постоянная, одинаковая для всех планет Солнечной системы:

$$\frac{R^3}{T^2} = k, \text{ или } \frac{1}{T^2} = \frac{k}{R^3}. \quad (4.1)$$

Причины таких закономерностей движения планет пытались выяснить и сам Кеплер. Однако строгое научное объяснение планетных движений было дано лишь И. Ньютоном. В упрощенной форме вывод закона всемирного тяготения из законов Кеплера и законов механики можно выполнить следующим образом.

Считая, что планеты движутся по окружностям, найдем центростремительное ускорение любой планеты:

$$a_{\text{цс}} = \frac{v^2}{R} = \frac{4\pi^2 R}{T^2}, \quad (4.2)$$

где T — период обращения планеты вокруг Солнца; R — радиус ее орбиты. Из выражений (4.1) и (4.2) получаем, что ускорение любой планеты независимо от ее массы обратно пропорционально квадрату радиуса ее орбиты:

$$a_{\text{цс}} = \frac{4\pi^2 Rk}{R^3} = 4\pi^2 k \frac{1}{R^2}. \quad (4.3)$$

Согласно второму закону механики сила, сообщающая планете это ускорение, равна:

$$F = ma = 4\pi^2 k \frac{m}{R^2}, \quad (4.4)$$

т. е. сила, действующая на любую планету, прямо пропорциональна массе планеты и обратно пропорциональна квадрату расстояния от нее до Солнца.

Согласно третьему закону механики сила, действующая со стороны Солнца на планету, равна по модулю и противоположна по направлению силе, с которой планета действует на Солнце. Обозначим последнюю через $\vec{F}'$ и по аналогии с формулой (4.4) запишем ее выражение:

$$F' = 4\pi^2 k' \frac{M}{R^2}, \quad (4.5)$$

где M — масса Солнца.

Так как $F = F'$, то $4\pi^2 k \frac{m}{R^2} = 4\pi^2 k' \frac{M}{R^2}$. Обозначим

$$\frac{4\pi^2 k}{M} = \frac{4\pi^2 k'}{m} = G, \quad (4.6)$$

где G — величина постоянная.

Следовательно,

$$4\pi^2 k = GM, \quad (4.7)$$

и выражение (4.4) можно записать в виде

$$F = G \frac{mM}{R^2}. \quad (4.8)$$

Это и есть математическая запись закона для сил тяготения, действующих между Солнцем и планетами: сила тяготения пропорциональна массе Солнца и массе планеты и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.

Сила всемирного тяготения и сила тяжести. Ньютон не остановился на получении выражения для силы тяготения, действующей между Солнцем и планетами. Он предположил, что природа силы, удерживающей планеты на их орбитах, тождественна по природе силе тяжести, действующей на все тела у земной поверхности.

Для проверки этого предположения Ньютон применил полученный закон (4.8) для вычисления ускорения движения Луны вокруг Земли, т. е. решил прямую задачу механики.

Ускорение Луны, движущейся под действием силы тяготения вокруг Земли по орбите, близкой к круговой, равно:

$$a_{\text{Л}} = \frac{F_{\text{т}}}{m_{\text{Л}}} = \frac{Gm_{\text{Л}}M}{m_{\text{Л}}R_{\text{Л}}^2} = G \frac{M}{R_{\text{Л}}^2}, \quad (4.9)$$

где M — масса Земли; $R_{\text{Л}}$ — расстояние от Земли до Луны. Поскольку сила тяготения тождественна по своей природе силе тяжести, действующей вблизи поверхности Земли, то для ускорения свободного падения тела любой массы m у поверхности Земли можно написать выражение

$$g = \frac{F_{\text{т}}}{m} = \frac{GmM}{mR_{\text{З}}^2} = G \frac{M}{R_{\text{З}}^2}, \quad (4.10)$$

где $R_{\text{З}}$ — радиус Земли.

Определим из выражения (4.10) постоянную G :

$$G = \frac{gR_{\text{З}}^2}{M}.$$

Подставив ее в выражение (4.9), получим

$$a_{\text{Л}} = \frac{gR_{\text{З}}^2}{M} \cdot \frac{M}{R_{\text{Л}}^2} = \frac{gR_{\text{З}}^2}{R_{\text{Л}}^2}.$$

Но расстояние от Земли до Луны в 60 раз больше радиуса Земли ($R_{\text{Л}} = 60R_{\text{З}}$), поэтому $a_{\text{Л}} = \frac{9,8 \text{ м/с}^2}{60^2} = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}^2$.

Экспериментальное значение ускорения Луны можно получить из кинематических расчетов:

$$a_{\text{Л}} = \frac{v^2}{R_{\text{Л}}} = \frac{4\pi^2 R_{\text{Л}}}{T^2}, \quad (4.11)$$

где T — период обращения Луны вокруг Земли. Подставляя значения $R_{\text{Л}} = 3,84 \cdot 10^8 \text{ м}$, $T = 27,3 \text{ сут.} = 27,3 \cdot 86\,400 \text{ с}$, получим $a_{\text{Л}} = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}^2$.

Хорошее соответствие результатов, полученных обоими способами, подтверждает предположение о единой природе силы, удерживающей Луну на орбите, и силы тяжести.

Обобщив этот вывод на все тела в природе, Ньютон получил закон всемирного тяготения: все тела притягиваются друг к другу с силой, прямо пропорциональной их массам и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними:

$$F = \frac{Gm_1m_2}{R^2}, \quad (4.12)$$

где коэффициент пропорциональности G , одинаковый для всех тел в природе, получил название *гравитационной постоянной*.

Гравитационная постоянная. Предположение о том, что гравитационные силы должны действовать между любыми материальными телами, экспериментально было доказано английским физиком Г. Кавендишем в 1788 г.

Кавендиш выполнил опыты по обнаружению гравитаци-

онного взаимодействия тел небольших размеров с помощью крутильных весов. Два одинаковых небольших шара из свинца диаметром примерно 5 см были укреплены на стержне длиной около 2 м, подвешенном на тонкой медной проволоке. Против малых шаров он устанавливал большие свинцовые шары диаметром 20 см каждый (рис. 1.24). Опыты показали, что при этом стержень с малыми шарами поворачивался, что говорит о наличии силы притяжения между свинцовыми шарами.

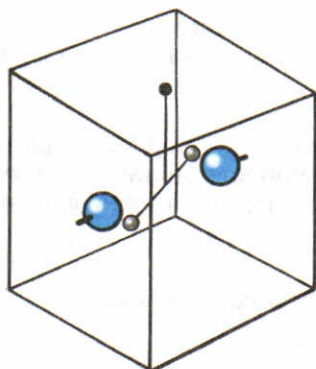


рис. 1.24

Повороту стержня препятствует сила упругости, возникающая при закручивании подвеса. Эта сила пропорциональна углу поворота. Силу гравитационного взаимодействия шаров, равную силе упругости, можно определить по углу поворота подвеса.

Массы шаров m_1 и m_2 , расстояние R между ними в опыте Кавендиша были известны, сила гравитационного взаимодействия F_g измерялась непосредственно, поэтому опыт позволил определить гравитационную постоянную G в законе всемирного тяготения. По современным данным, она равна:

$$G = 6,6720 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-2}.$$

Заметим, что формула (4.12) применима для материальных точек, а также для шаров, плотность которых распределена сферически симметрично относительно их центров. В других случаях для вычисления силы взаимодействия между телами произвольной формы их мысленно разбивают на малые участки, находят силы взаимодействия между всеми участками и затем суммируют векторно все эти силы.

Определение масс небесных тел. Нахождение массы планеты, у которой есть спутники, — задача несложная. Планета массой M притягивает свой спутник массой m , расположенный на расстоянии R от центра планеты, с силой, которая определяется законом всемирного тяготения:

$$F = G \frac{mM}{R^2}.$$

В соответствии со вторым законом Ньютона эта сила сообщает спутнику ускорение

$$a = \frac{F}{m} = G \frac{M}{R^2}.$$

Для простоты расчета будем считать, что спутник движется по круговой орбите радиусом R . Тогда ускорение, которое мы

определяем, равно центростремительному ускорению спутника при движении его по орбите:

$$a_{\text{цс}} = \frac{v^2}{R} = \frac{4\pi^2 R}{T^2},$$

где T — период обращения спутника вокруг планеты; v — скорость движения спутника по орбите.

Приравнявая два выражения для ускорения, получаем

$$G \frac{M}{R^2} = \frac{v^2}{R} = \frac{4\pi^2 R}{T^2}.$$

Отсюда находим:

$$M = \frac{v^2 R}{G} = \frac{4\pi^2 R^3}{GT^2}. \quad (4.13)$$

Значения R и T для спутника планеты можно определить из астрономических наблюдений. Понятно, что таким же путем можно найти и массу Солнца, если рассматривать планеты в качестве его спутников.

Если у планеты нет спутника, то задача определения ее массы сложнее. В этом случае приходится вычислять ускорение, которое вызывает исследуемая планета у других, более удаленных небесных тел. Такие измерения трудны и менее точны. Чем больше расстояние до небесного тела, тем меньше получаемое им ускорение, тем труднее его измерить.

В настоящее время стало возможным определение масс планет по ускорениям, которые они вызывают у пролетающих вблизи них космических аппаратов.

■ Вопросы

1. Какие экспериментальные факты были использованы И. Ньютоном при выводе закона всемирного тяготения? 2. Как можно измерить массу Земли? 3. Какими сведениями необходимо располагать о спутнике планеты для того, чтобы можно было определить массу планеты?

■ ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1. Каким должен быть радиус круговой орбиты искусственно-го спутника Земли, чтобы спутник все время находился над одной и той же точкой земной поверхности на экваторе?

Решение. Для того чтобы спутник, двигаясь по круговой орбите, находился все время над одной и той же точкой земной поверхности на экваторе, необходимо, чтобы период обращения спутника вокруг Земли T_c был равен периоду обращения Земли вокруг своей оси T_3 .

Центростремительное ускорение спутника, создаваемое силой гравитационного притяжения его к Земле, равно: $a_{\text{цс}} = \frac{F_{\text{г}}}{m}$.

Выразим это ускорение через скорость спутника и радиус его орбиты, а силу $F_{\text{г}}$ с помощью закона всемирного тяготения: $a_{\text{цс}} =$

$= \frac{v^2}{R} = \frac{4\pi^2 R^2}{T_c^2 R} = \frac{4\pi^2 R}{T_c^2}$, $F_{\tau} = G \frac{mM}{R^2}$, где R — радиус орбиты; M — масса Земли.

Далее получим $\frac{4\pi^2 R}{T_c^2} = G \frac{M}{R^2}$. Отсюда $R = \sqrt[3]{\frac{GMT_c^2}{4\pi^2}} = \sqrt[3]{\frac{GMT_{\frac{2}{3}}^2}{4\pi^2}}$.

Расчеты дают следующий результат:

$$R = \sqrt[3]{\frac{6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 6 \cdot 10^{24} \cdot (86\,400)^2}{4\pi^2}} \text{ м} = 4,2 \cdot 10^7 \text{ м}.$$

Задача 2. Определите ускорение свободного падения у поверхности Солнца по следующим данным: расстояние от Земли до Солнца $1,496 \cdot 10^{11}$ м; угол, под которым видно Солнце с Земли, равен $32'$, период обращения Земли вокруг Солнца $3,1557 \cdot 10^7$ с.

Решение. Ускорение свободного падения на Солнце равно:

$$g_c = G \frac{M_c}{R_c^2}, \quad (1)$$

где M_c и R_c — соответственно масса и радиус Солнца.

Радиус Солнца R_c можно определить из геометрического соотношения

$$R_c = \frac{D}{2} = \frac{R \sin \alpha}{2}, \quad (2)$$

где R — расстояние от Земли до Солнца; α — угол, под которым виден диаметр Солнца с Земли.

Массу Солнца определим, применив второй закон Ньютона к движению Земли вокруг Солнца:

$$F = M_3 a, \quad G \frac{M_3 M_c}{R^2} = M_3 \frac{4\pi^2 R}{T_3^2}, \quad M_c = \frac{4\pi^2 R^3}{G T_3^2}. \quad (3)$$

Из выражений (1) — (3) получим $g_c = G \frac{4\pi^2 R^3 \cdot 4}{G T_3^2 R^2 \sin^2 \alpha} = \frac{16\pi^2 R}{T_3^2 \sin^2 \alpha}$;

$$g_c = \frac{16\pi^2 \cdot 149,6 \cdot 10^9}{(3,1557 \cdot 10^7)^2 \text{ м/с}^2 \cdot \sin^2 32'} \approx 274 \text{ м/с}^2.$$

■ Задачи для самостоятельного решения

4.1. Согласно второму закону Ньютона ускорение тела обратно пропорционально его массе. Почему же при свободном падении ускорения всех тел одинаковы?

4.2. Считая орбиты планет круговыми, найдите зависимость периода обращения планеты вокруг Солнца от радиуса ее орбиты. Как изменилась бы эта зависимость, если бы сила тяготения была обратно пропорциональна не квадрату расстояния между планетой и Солнцем, а кубу расстояния?

4.3. Определите массу Солнца, считая, что Земля обращается вокруг него по круговой орбите радиусом $R = 1,5 \cdot 10^{11}$ м.

4.4. Определите массу планеты Марс, если известно, что спутник Марса — Фобос — обращается вокруг него по орбите радиусом $R=9400$ км с периодом $T=7$ ч 39 мин.

4.5. Космический корабль движется по круговой орбите вокруг Земли с периодом, равным периоду обращения Луны вокруг Земли. Во время движения корабль находится на прямой, соединяющей центры Земли и Луны, на таком расстоянии от Земли, что силы притяжения, действующие на него со стороны Земли и Луны, равны друг другу. Работают ли двигатели корабля? Если работают, то в какую сторону происходит выброс газа из двигателей? Каков вес космонавта массой 70 кг на корабле? Период обращения Луны вокруг Земли 27,3 сут., отношение масс Земли и Луны 81, расстояние от Земли до Луны составляет 60 земных радиусов, радиус Земли 6400 км.

§ 5 Принцип относительности

Принцип относительности и система отсчета. Законами Ньютона можно пользоваться не в любой системе отсчета, а только в инерциальных системах.

В системах отсчета, движущихся друг относительно друга равномерно и прямолинейно, ускорение — величина инвариантная. В механике рассматриваются силы, зависящие от расстояния между телами — силы тяготения, от деформации тела — силы упругости, от относительной скорости движения одного тела относительно другого — силы трения. Но и расстояние, и деформация, и относительная скорость — величины, инвариантные в системах отсчета, движущихся равномерно и прямолинейно друг относительно друга. Поэтому в таких системах отсчета сила также является инвариантной величиной.

Если при переходе из одной системы отсчета в другую, движущуюся относительно первой прямолинейно и равномерно, силы, ускорения и массы тел не меняются, то при таком переходе остаются неизменными и все соотношения между этими величинами, в том числе и законы Ньютона.

Г. Галилей, исходя из наблюдений над природными явлениями, сформулировал фундаментальный физический принцип (впоследствии названный *классическим принципом относительности*), согласно которому во всех инерциальных системах отсчета все механические явления протекают одинаково при одинаковых начальных условиях.

Оговорка о том, что должны быть заданы одинаковые начальные условия, играет весьма существенную роль. Так, например, наблюдатели на Земле и в вагоне, движущемся относительно ее поверхности равномерно и прямолинейно, следя за свободным падением тела, увидят разные траектории движения. Если тело в начальный момент неподвижно относительно Земли, то в системе отсчета, связанной с Землей, траекторией тела является прямая линия, а в системе отсчета, связанной с вагоном, — парабола. Это, однако, не проти-

воречит принципу относительности, так как в этих системах отсчета различны начальные условия. В момент начала падения в системе отсчета, связанной с Землей, рассматриваемое тело покоится, а в системе отсчета, связанной с движущимся вагоном, оно имеет начальную скорость, равную по модулю скорости движения вагона относительно Земли, но направленную в противоположную сторону. Именно поэтому падение тела и выглядит неодинаково для разных наблюдателей.

Но если в равномерно и прямолинейно движущемся вагоне тело в начальный момент времени неподвижно относительно вагона, то, как утверждает классический принцип относительности, в вагоне все произойдет точно так же, как и на Земле: траекторией падающего тела будет прямая. Время падения его на пол вагона будет равно времени падения тела с той же высоты на Землю. Опыты подтверждают этот принцип.

Классический принцип относительности утверждает одинаковость протекания механических явлений в разных инерциальных системах отсчета, но отсюда не следует, что все механические величины в этих системах одинаковы. Например, скорость летящей птицы, измеренная в системе отсчета «берег», будет отличаться от скорости, измеренной в системе отсчета «корабль». Но нет никаких оснований считать, что одна из этих скоростей «истинная», а другая — нет. Другими словами, классический принцип относительности, раскрывая относительность некоторых характеристик движения (перемещения, координаты, скорости), утверждает абсолютность законов динамики (законов Ньютона).

Именно поэтому, находясь в какой-либо инерциальной системе отсчета, нельзя с помощью механических опытов установить, движется эта система равномерно и прямолинейно или покоится. Нет никаких оснований отдать какой-либо из систем отсчета предпочтение.

Неинерциальные системы отсчета. В инерциальных системах отсчета ускорение тела согласно ньютоновской механике представляет собой результат его взаимодействия с другими телами, иначе говоря, результат действия сил.

Но существуют системы отсчета, в которых наблюдается ускоренное движение тел без воздействия на них каких-либо тел. Рассмотрим простой пример. В неподвижном вагоне поезда на гладком столе стоит игрушечный автомобиль (рис. 1.25). При начале движения вагона вправо с ускорением $\vec{w}$ игрушка своего положения относительно рельсов не изменит, если

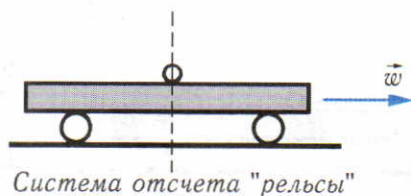
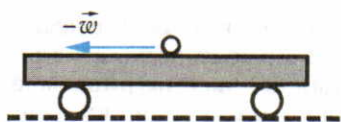


рис. 1.25



Система отсчета "вагон"

рис. 1.26

действием сил трения можно пренебречь. Относительно столика в вагоне игрушка будет катиться влево с ускорением $-\vec{w}$, равным по модулю ускорению самого вагона относительно рельсов, но направленным противоположно (рис. 1.26). С точки зрения на-

блюдателя, находящегося в вагоне, второй и третий законы динамики нарушились, так как ускорение игрушки возникло при отсутствии сил, действующих на эту модель.

Системы отсчета, в которых наблюдается ускоренное движение тел при отсутствии действия на них сил со стороны других тел, называются неинерциальными системами отсчета. Причиной неинерциальности систем отсчета является ускоренное движение этих систем отсчета относительно инерциальной системы.

Движение тел в неинерциальных системах отсчета можно описывать таким образом, как будто и в этих системах отсчета выполняется второй закон Ньютона, если формально считать, что здесь, кроме реальных сил взаимодействия, существуют еще так называемые *силы инерции*.

Чтобы получить выражение для силы инерции, надо ускорение, с которым движется система отсчета, взятое с противоположным знаком, умножить на массу ускоряемого тела:

$$\vec{F}_{\text{ин}} = -m\vec{w}. \quad (5.1)$$

Для рассмотренного выше примера можно сказать, что на модель автомобиля подействовала сила инерции $\vec{F}_{\text{ин}}$ (рис. 1.27):

$$\vec{F}_{\text{ин}} = -m\vec{w}.$$

Введение сил инерции дает формальную возможность не отказываться от второго закона Ньютона и в неинерциальных системах отсчета. Каждый раз, когда речь идет о действующих на тело силах, нужно, кроме различных сил, обусловленных взаимодействием тел, рассматривать также и силы инерции.

Второй закон Ньютона будет выглядеть так:

$$\sum \vec{F} + \vec{F}_{\text{ин}} = m\vec{a}, \quad (5.2)$$

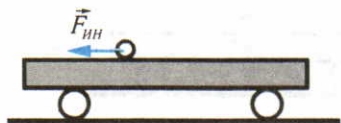


рис. 1.27

где $\vec{a}$ — ускорение тела относительно неинерциальной системы отсчета; $\sum \vec{F}$ — сумма реальных сил, действующих на тело.

Например, рассматривая тело массой m в системе отсчета «лифт»,

движущейся с ускорением $\vec{w}$, направленным вертикально вверх, кроме силы тяжести $m\vec{g}$ и силы реакции опоры $\vec{N}$, следует ввести силу инерции $\vec{F}_{ин} = -m\vec{w}$ (рис. 1.28).

На основе выражения (5.2) с учетом того, что тело покоится относительно лифта, получим

$$m\vec{g} + \vec{N} + \vec{F}_{ин} = 0,$$

или в проекции на вертикальную ось Y:

$$N - mg - mw = 0,$$

откуда $N = m(g + w)$.

В случае движения лифта с ускорением $\vec{w}$, направленным вертикально вниз, получим (рис. 1.29)

$$m\vec{g} + \vec{N} + \vec{F}_{ин} = 0,$$

или

$$N - mg + mw = 0.$$

Тогда

$$N = m(g - w).$$

Рассматривая движения тел относительно поверхности Земли, необходимо учитывать, что Земля вращается вокруг своей оси и все точки ее поверхности имеют центростремительное ускорение $w = \omega^2 r$, где r — расстояние от данной точки до оси вращения. Следовательно, Земля является неинерциальной системой отсчета, и только малость центростремительного ускорения ($w_{\max} = 0,034 \text{ м/с}^2$) по сравнению с ускорением свободного падения на Земле позволяет при решении ряда задач считать Землю инерциальной системой отсчета.

Однако при объяснении, например, понятия веса тела неинерциальностью Земли пренебречь нельзя. Если бы Земля не вращалась, то на тело действовала бы только сила тяготения $\vec{F}_т$. Вес тела $\vec{P}$, измеренный по действию тела на опору, равен был бы по модулю силе тяготения $\vec{F}_т$ и направлен к центру Земли. Однако Земля вращается, и в системе отсчета, связанной с Землей, на тело действует сила инерции, направленная от оси вращения и перпендикулярно ей:

$$\vec{F}_{ин} = -m\vec{w} = m\omega^2 \vec{r}.$$

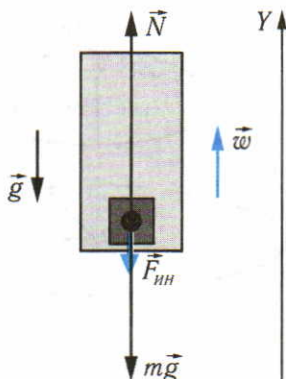


рис. 1.28

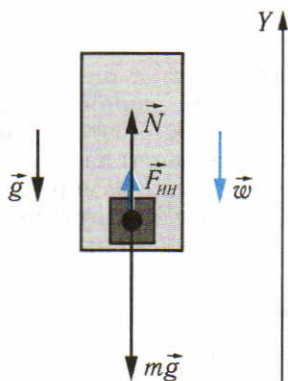


рис. 1.29

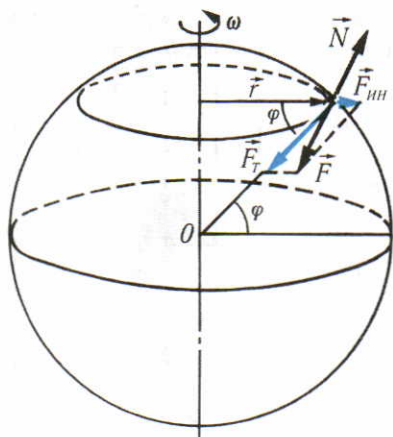


рис. 1.30

В результате сила $\vec{F}$, действующая на тело, оказывается равной не силе тяготения $\vec{F}_т$, а равнодействующей сил $\vec{F}_т$ и $\vec{F}_ин$ (рис. 1.30). Силу $\vec{P}$, равную $\vec{F}$, но приложенную к опоре, называют весом тела. Из рисунка видно, что сила $\vec{P}$ на любой широте φ , отличной от 0° и 90° , не направлена к центру Земли.

Сила инерции, действующая во вращающейся системе отсчета на неподвижные в этой системе тела, по модулю равна $F_{ин} = m\omega^2 r = m\omega^2 R \cos \varphi$, где $r = R \cos \varphi$ — расстояние от тела до оси вра-

щения; φ — широта местности. Это расстояние на различных широтах разное. На экваторе оно наибольшее, на полюсе равно нулю. Поэтому на различных широтах сила $F_{ин}$, а значит, и вес тела P имеют различные значения. В этом можно убедиться, измеряя действие тела на опору или подвес на различных широтах Земли. Заметим, что эта разница невелика, она меньше или равна (на экваторе) $0,34\%$.

Вопросы

1. Как формулируется классический принцип относительности? 2. В каких системах отсчета справедлив этот принцип? 3. Почему необходима оговорка, что явления протекают одинаково при одинаковых начальных условиях? 4. Какие системы отсчета называют неинерциальными? 5. Почему при решении многих практических задач Землю можно считать инерциальной системой отсчета? 6. В каких системах отсчета вводят понятие о силах инерции?

Задачи для самостоятельного решения

5.1. При каком движении самолета в нем возникает состояние невесомости?

5.2. Считая Землю шаром радиусом $6,4 \cdot 10^6$ м, определите изменение веса тела массой 2 кг при перемещении его с полюса на экватор.

5.3. Тело массой 1 кг, подвешенное на нити длиной 1 м, описывает в горизонтальной плоскости окружность с частотой 1 с^{-1} . Определите модуль силы упругости нити $\vec{F}_{упр}$ и угол α , который образует нить с вертикалью.

5.4. Считая Землю шаром радиусом $6,4 \cdot 10^6$ м, определите угол отклонения отвеса от направления на центр Земли на широте 45° .

5.5. При какой продолжительности суток на Земле вес тела на экваторе был бы равен нулю?

5.6. Мотоциклист, участвуя в аттракционе «гонки на мотоциклах по вер-

тикальной стене», развивает скорость 60 км/ч. Определите угол наклона мотоцикла к стене, если радиус закругления стены аттракциона 7 м.

5.7*. Какую форму имеет поверхность жидкости во вращающемся цилиндрическом сосуде?

§ 6 Вращательное движение тел

Кинематика вращательного движения. *Вращательным движением* называется такое движение тела, при котором все его точки движутся по окружностям, центры которых лежат на одной прямой, называемой осью вращения, а плоскости окружностей перпендикулярны оси вращения. Вращается вокруг своей оси планета Земля, вследствие чего происходит смена дня и ночи, вращаются роторы турбин, шестерни и валы во всевозможных станках и машинах. Вращательным является движение диска проигрывателя, лопастей вентилятора.

Сложные движения можно рассматривать как сочетания поступательного и вращательного движения. Движение колеса автомобиля, например, складывается из вращения колеса вокруг своей оси и поступательного движения оси относительно дороги.

В § 1 было введено понятие угловой скорости при равномерном движении тела по окружности. Это определение можно обобщить на случай неравномерного движения аналогично тому, как было введено понятие о мгновенной скорости материальной точки:

$$\omega = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \varphi}{\Delta t}. \quad (6.1)$$

Если тело за любые равные промежутки времени поворачивается на одинаковые углы, то такое движение называют *равномерным вращательным движением*.

Используя понятие угловой скорости, можно дать еще одно определение равномерному вращательному движению. Равномерным вращательным движением называют движение с постоянной угловой скоростью ($\omega = \text{const}$). Примером вращательного движения, близкого к равномерному, может служить вращение Земли вокруг своей оси.

Равномерное вращательное движение встречается сравнительно редко. Гораздо чаще приходится иметь дело с вращательным движением, при котором угловая скорость с течением времени изменяется. С примерами неравномерного вращательного движения мы встречаемся повседневно. На разных участках пути с неодинаковой угловой скоростью вращаются колеса велосипедов, мотоциклов, автомобилей.

Изменение угловой скорости со временем характеризуется *угловым ускорением*. Угловым ускорением ε называется

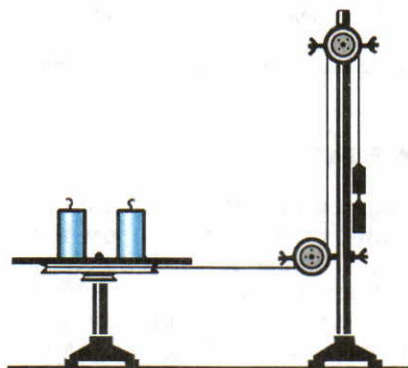


рис. 1.31

предел отношения изменения угловой скорости $\Delta\omega$ к изменению времени Δt при условии $\Delta t \rightarrow 0$:

$$\varepsilon = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\omega}{\Delta t}. \quad (6.2)$$

Основной закон динамики вращательного движения. Закон динамики вращательного движения может быть получен опытным путем. Для этого можно воспользоваться прибором, внешний вид которого представлен на рисунке 1.31. Металлический диск укреплен

на вертикальной оси с помощью шарикоподшипника. Силы трения, возникающие в подшипнике при вращении диска, настолько малы, что их влиянием на результат эксперимента можно пренебречь. Диск приводят во вращение с помощью намотанной на шкив нити, перебрасывая ее через блок и подвешивая к ее концу груз. Перемещение груза вниз под действием силы тяжести приводит диск во вращение.

Если начальная угловая скорость вращения диска равна нулю $\omega_0 = 0$, то ее значение ω_t при вращении с постоянным угловым ускорением в любой момент времени t определяется выражением

$$\omega_t = \varepsilon t.$$

Измерив время t падения груза и максимальную угловую скорость ω_t , которую приобретает диск за это время, можно определить угловое ускорение по формуле

$$\varepsilon = \frac{\omega_t}{t}.$$

Исследование зависимости углового ускорения вращения диска от модуля приложенной силы F при постоянном плече d силы относительно данной оси вращения показывает, что при увеличении силы в 2, 3, 4 раза и т. д. угловое ускорение ε увеличивается соответственно во столько же раз. Следовательно, угловое ускорение вращающегося тела прямо пропорционально модулю приложенной силы при постоянном плече d этой силы.

Под диском в приборе установлены два шкива с разными радиусами. Наматывая нить на шкив, имеющий в два раза больший радиус, и выполнив измерения, можно увидеть, что увеличение плеча силы в два раза при постоянной по модулю приложенной силе приводит к увеличению углового ускорения диска также в два раза.

Так как угловое ускорение прямо пропорционально силе F при постоянном значении плеча d силы и плечу силы относительно данной оси вращения при постоянном значении приложенной силы F , то очевидно, что оно пропорционально их произведению, т. е. моменту силы $M = Fd$:

$$\varepsilon = kM, \quad (6.3)$$

где k — коэффициент пропорциональности.

Зависимость углового ускорения от свойств вращающегося тела. Если проделать описанные опыты с другими телами, то зависимость углового ускорения их вращения от момента приложенных сил будет точно такой же по форме, но коэффициент пропорциональности k будет иметь другое значение. Следовательно, угловое ускорение ε зависит еще от свойств вращающегося тела. Опыт показывает, что при том же моменте приложенной силы угловое ускорение вращения диска зависит от массы вращающегося тела и от расположения частей тела относительно оси вращения. Для характеристики этого свойства тела ввели величину I , называемую *моментом инерции* вращающегося тела относительно данной оси вращения:

$$I = \frac{1}{k} = \frac{M}{\varepsilon}. \quad (6.4)$$

Результаты экспериментов по исследованию вращательного движения можно записать в виде:

$$\varepsilon = \frac{M}{I}. \quad (6.5)$$

Угловое ускорение ε вращающегося тела прямо пропорционально сумме моментов M всех приложенных к нему сил относительно оси вращения тела и обратно пропорционально моменту инерции I тела относительно этой оси вращения. Это основное уравнение динамики вращательного движения тела.

Полученное уравнение аналогично по форме записи выражению второго закона Ньютона для поступательного движения тела. Ускорению $\vec{a}$ поступательного движения тела соответствует угловое ускорение ε вращательного движения, аналогом силы F при поступательном движении является момент силы M во вращательном движении, а аналогом массы m тела при поступательном движении служит момент инерции I тела во вращательном движении.

Вычисление момента инерции. Момент инерции тела сравнительно простой формы может быть определен путем вычислений.

Рассмотрим простейший случай — вращение тела по окружности в случае, когда размеры тела пренебрежимо малы по сравнению с радиусом окружности.

Если к телу, закрепленному на расстоянии R от неподвижной оси, приложена сила F , направленная перпендикулярно связи и оси вращения, то тело приобретает тангенциальное ускорение:

$$a_{\tau} = \frac{F}{m}, \quad (6.6)$$

так как за очень малый промежуток времени Δt движение тела по окружности можно считать прямолинейным.

С другой стороны, рассматривая движение тела как вращательное, угловое ускорение его движения можно определить из основного уравнения динамики вращательного движения [см. формулу (6.5)].

Из уравнения (6.5) и учитывая уравнение (6.6), получим выражение для момента инерции тела:

$$I = \frac{M}{\varepsilon} = \frac{FR}{\varepsilon} = \frac{ma_{\tau}R}{\varepsilon}. \quad (6.7)$$

Так как $a_{\tau} = \frac{\Delta v_{\kappa}}{\Delta t}$, а $v_{\kappa} = \omega R$, то $a_{\tau} = \frac{\Delta \omega R}{\Delta t} = \varepsilon R$. (6.8)

Отсюда получим

$$I = \frac{ma_{\tau}R}{\varepsilon} = \frac{m\varepsilon R^2}{\varepsilon} = mR^2. \quad (6.9)$$

Момент инерции тела, вращающегося по окружности радиусом R , бóльшим по сравнению с размерами тела, равен произведению массы тела на квадрат расстояния от него до оси вращения. По этой формуле можно, например, вычислить момент инерции планеты относительно оси вращения, проходящей через Солнце и перпендикулярной плоскости орбиты планеты.

Полученный результат [см. формулу (6.9)] позволяет решить задачу о нахождении момента инерции тела произвольной формы относительно любой оси вращения. Для этого необходимо мысленно разбить тело на очень малые части, найти произведение массы каждой части на квадрат расстояния от нее до оси вращения и все эти произведения сложить. Эту операцию можно произвести сравнительно просто для таких тел, как обруч, тонкостенный цилиндр и т. д. Все точки обруча находятся на одинаковом расстоянии от оси вращения, проходящей через его центр перпендикулярно плоскости обруча. Момент инерции любой точки на обруче относительно этой оси равен mr^2 . Момент инерции обруча, равный сумме моментов инерции каждой его точки, определится выражением

$$I = m_1r^2 + m_2r^2 + m_3r^2 + \dots = r^2(m_1 + m_2 + \dots) = Mr^2,$$

где $M = m_1 + m_2 + m_3 + \dots$ — масса обруча.

Различные точки шара, цилиндра и других тел находятся на разных расстояниях от оси вращения, поэтому расчет момента инерции таких тел более сложен и производится методом высшей математики, называемым интегрированием.

Момент инерции тела произвольной формы можно определить опытным путем. Для этого нужно измерить угловое ускорение вращения тела при известном моменте приложенной силы и вычислить момент инерции тела относительно заданной оси вращения, используя уравнение (6.4).

Единица момента инерции. Из уравнения (6.4) можно получить единицу момента инерции в СИ — килограмм на метр в квадрате ($\text{кг} \cdot \text{м}^2$). Тело имеет момент инерции, равный $1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, если под действием момента силы $1 \text{ Н} \cdot \text{м}$ приобретает угловое ускорение 1 рад/с^2 .

Момент инерции тела человека, стоящего с прижатыми к туловищу руками относительно вертикальной оси, проходящей через его центр масс, равен примерно $1,2 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$. Вытянув в стороны руки и расставив ноги, человек увеличивает свой момент инерции относительно той же оси почти в семь раз.

Теорема Штейнера. Для разных осей вращения момент инерции одного и того же тела различен.

Если известен момент инерции I_0 относительно любой оси, проходящей через центр масс тела, то для расчета момента инерции I этого тела относительно другой оси, параллельной первой и отстоящей от нее на расстоянии d , используется соотношение, известное как теорема Штейнера (см. задачу 1):

$$I = I_0 + md^2. \quad (6.10)$$

В таблице 1 приведены формулы для вычисления моментов инерции некоторых тел относительно оси, проходящей через центр масс этих тел.

Таблица 1

Тело	Ось вращения проходит	Момент инерции I_0
Обруч	через центр обруча перпендикулярно плоскости обруча	mR^2
Диск (цилиндр)	через центр диска перпендикулярно плоскости диска	$0,5mR^2$
Диск	через центр диска вдоль его диаметра	$0,25mR^2$
Шар	через центр шара	$0,4mR^2$
Стержень длиной l	через середину тонкого стержня перпендикулярно ему	$\frac{1}{12} ml^2$

■ Вопросы

1. Что называется угловой скоростью? 2. Как связаны между собой линейная и угловая скорости? 3. Что называется угловым ускорением? 4. Как формулируется основное уравнение динамики вращательного движения?

5. Какие вам известны примеры использования вращательного движения в технике? 6. Почему, говоря о значении момента инерции тела, надо обязательно указывать, относительно какой оси он определяется?

■ ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1. Докажите теорему Штейнера для системы, состоящей из двух материальных точек, вращающихся вокруг оси, перпендикулярной прямой, соединяющей эти точки.

Решение. Рассмотрим систему, состоящую из двух материальных точек 1, 2 массами m_1 и m_2 . Относительно оси вращения, проходящей через центр масс такой системы перпендикулярно прямой, соединяющей точки, момент инерции системы равен:

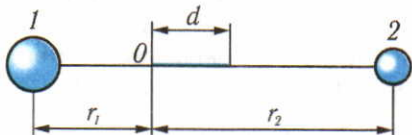


рис. 1.32

перпендикулярно прямой, соединяющей точки, момент инерции системы равен:

$$I_0 = m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2, \quad (1)$$

где r_1 и r_2 — соответственно расстояния от точек 1 и 2 до центра масс системы (рис. 1.32). Момент инерции этой же системы относительно оси, проходящей параллельно первой, но смещенной на расстояние d , равен:

$$I = m_1 (r_1 + d)^2 + m_2 (r_2 - d)^2. \quad (2)$$

Произведя преобразования, получим

$$I = (m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2) + (m_1 + m_2) d^2 + 2d(m_1 r_1 - m_2 r_2). \quad (3)$$

Так как точка O является центром масс системы материальных точек, то согласно определению центра масс выполняется соотношение

$$m_1 r_1 = m_2 r_2. \quad (4)$$

Подставляя выражения (1) и (4) в формулу (3), получим $I = I_0 + (m_1 + m_2) d^2$, что и требовалось доказать.

Задача 2. Вследствие действия приливов, вызванных притяжением Луны и Солнца, продолжительность суток на Земле увеличивается за $\Delta t = 100$ лет на $\Delta T = 0,001$ с. Определите приливную силу трения. Землю можно считать однородным шаром массой $6 \cdot 10^{24}$ кг и радиусом $6,4 \cdot 10^6$ м.

Решение. Из основного уравнения динамики вращательного движения следует, что момент силы трения $M_{\text{тр}} = I\varepsilon$.

Момент инерции Земли $I = 0,4mR^2$.

Изменение угловой скорости Земли равно: $\Delta\omega = \frac{2\pi}{T} - \frac{2\pi}{T+\Delta T} \approx \approx \frac{2\pi\Delta T}{T^2}$, а угловое ускорение $\varepsilon = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{2\pi\Delta T}{T^2\Delta t}$, где $\Delta t = 100$ лет $= 100 \times \times 365 \cdot 24 \cdot 3600$ с. Представим упрощенно действие приливной волны как действие приливной силы трения $F_{\text{тр}}$, приложенной

перпендикулярно радиусу Земли на экваторе. Момент приливной силы трения равен:

$$M_{\text{тр}} = F_{\text{тр}} R.$$

Подставив значения момента инерции Земли I , углового ускорения и момента приливной силы трения $M_{\text{тр}}$ в основное уравнение динамики вращательного движения, получим $0,4mR^2 \frac{2\pi\Delta T}{T^2\Delta t} = F_{\text{тр}} R$.

$$\text{Отсюда } F_{\text{тр}} = \frac{0,8\pi m R \Delta T}{T^2 \Delta t}.$$

Проведя вычисления, найдем:

$$F_{\text{тр}} = \frac{0,8 \cdot 3,14 \cdot 6 \cdot 10^{24} \cdot 6,4 \cdot 10^6 \cdot 0,001}{(24 \cdot 3600)^2 \cdot 100 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600} \text{ Н} \approx 4 \cdot 10^9 \text{ Н}.$$

Задача 3. Цилиндр скатывается без проскальзывания с наклонной плоскости с углом при основании α . Рассчитайте ускорение центра масс цилиндра.

Решение. На цилиндр действуют сила тяжести $m\vec{g}$, сила реакции опоры $\vec{N}$ и сила трения $\vec{F}_{\text{тр}}$ (рис. 1.33). Запишем уравнение второго закона Ньютона в проекциях на ось X и основное уравнение вращательного движения цилиндра относительно его центра масс:

$$ma = mgs \sin \alpha - F_{\text{тр}}, \quad I\varepsilon = M.$$

Но для сплошного диска $I = mr^2/2$, а угловое ускорение $\varepsilon = a/r$. Итак,

$$ma = mgs \sin \alpha - F_{\text{тр}}, \quad \frac{mr^2}{2} \cdot \frac{a}{r} = F_{\text{тр}} r.$$

Отсюда

$$a = \frac{2}{3} g \sin \alpha.$$

Решение задачи упрощается, если записать уравнение вращательного движения относительно точки A , используя теорему Штейнера:

$$(I_0 + mr^2) \frac{a}{r} = mgr \sin \alpha,$$

откуда сразу следует, что

$$a = \frac{2}{3} g \sin \alpha.$$

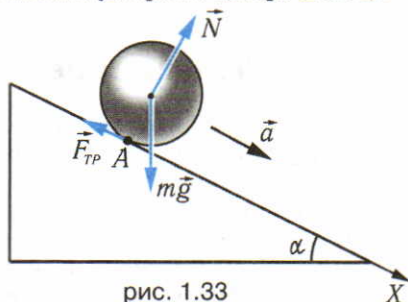


рис. 1.33

■ Задачи для самостоятельного решения

6.1. Определите моменты инерции цилиндра массой m , радиусом R и длиной l относительно: а) оси цилиндра; б) образующей цилиндра; в) оси, перпендикулярной оси цилиндра и проходящей через край цилиндра (цилиндр очень тонкий).

6.2. На барабан радиусом $R = 0,5$ м с горизонтальной осью вращения намотан шнур, к концу которого привязан груз массой $m = 10$ кг. Найдите мо-

мент инерции барабана, если известно, что его угловое ускорение равно $\varepsilon = 2 \text{ рад/с}^2$. Трением пренебречь.

6.3. К ободу однородного диска радиусом $R = 0,2 \text{ м}$ и массой $1,2 \text{ кг}$ приложена постоянная сила 100 Н . При вращении на диск действует момент силы трения, равный $5 \text{ Н} \cdot \text{м}$. Чему равно угловое ускорение диска?

6.4. Через неподвижный блок, представляющий собой диск массой m_0 , перекинута невесомая и нерастяжимая нить, к концам которой подвешены два груза массами m_1 и m_2 . Чему равны модули ускорения грузов и сил натяжения нити?

6.5. Цилиндрический маховик массой m и радиусом R вращается с угловой скоростью ω . С какой силой нужно прижать к маховику тормозную колодку, чтобы он остановился через промежуток времени, равный t ? Коэффициент трения между колодкой и маховиком равен μ .

6.6*. Мальчик бросает обруч радиусом R в горизонтальном направлении со скоростью v , одновременно сообщая ему вращение в обратную сторону с угловой скоростью ω . При каком соотношении между заданными величинами обруч покатится обратно к мальчику?

§ 7 Условия равновесия тел

Раздел механики, в котором изучаются условия равновесия твердых тел, называется *статикой*. Знание условий равновесия твердых тел важно для расчетов машин и механизмов, транспортных средств и различных сооружений.

В статике твердое тело рассматривается как абсолютно твердое, т. е. недеформируемое тело. Фактически это означает, что деформация много меньше первоначальных размеров тела, так что ею можно пренебречь. Такая модель, как и любая модель, применима лишь в определенных границах.

Условия равновесия твердого тела можно получить как следствия законов динамики поступательного и вращательного движения твердого тела. Первое условие равновесия является следствием второго закона Ньютона:

$$\sum \vec{F} = m\vec{a},$$

где $\sum \vec{F}$ — векторная сумма сил, действующих на тело. Из этого закона следует, что при выполнении условия

$$\sum \vec{F} = 0 \quad (7.1)$$

и при равенстве начальной скорости нулю ($v_0 = 0$) тело не будет перемещаться в данной системе отсчета.

Условие (7.1) — необходимое условие равновесия твердого тела, но недостаточное, так как твердое тело может не только двигаться поступательно, но и вращаться.

Второе условие равновесия твердого тела получается из основного уравнения динамики вращательного движения твердого тела:

$$\sum M = I\varepsilon,$$

где $\sum \vec{M}$ — векторная сумма моментов сил, действующих на твердое тело. Из этого уравнения следует, что при выполнении равенства

$$\sum \vec{M} = 0 \quad (7.2)$$

и при нулевой начальной угловой скорости ($\omega_0 = 0$) твердое тело вращаться не будет.

Таким образом, для того чтобы твердое тело находилось в равновесии и покоилось, необходимо и достаточно выполнение следующих условий: векторные суммы действующих сил и моментов сил относительно любой оси должны быть равны нулю (при равенстве нулю начальной скорости v_0 поступательного движения и равенства нулю начальной скорости ω_0 вращательного движения).

Все сказанное выше справедливо для инерциальных систем отсчета. В неинерциальных системах отсчета условия равновесия составляются таким же образом, но к действующим на тело силам добавляют силы инерции.

Полученные выше условия равновесия твердого тела позволяют определить силы реакции, действующие на тело со стороны других тел.

Пара сил. Система двух равных по модулю и антипараллельных сил $\vec{F}$ и $-\vec{F}$, линии действия которых не совпадают (рис. 1.34), называется *парой сил*. Момент сил такой пары относительно любой точки

$$M = Fd,$$

где d — кратчайшее расстояние между линиями действия сил. Пару сил нельзя заменить одной равнодействующей силой, иными словами, пара сил не имеет равнодействующей.

Центр тяжести и центр масс. *Центром тяжести* тела называют точку, через которую при любом положении тела в пространстве проходит равнодействующая сил тяжести, действующих на все частицы тела. Из этого определения следует простой способ нахождения центров тяжести плоских фигур. Если такую фигуру подвешивать на нити последовательно к разным ее точкам, то направления, отмеченные нитью отвеса, пересекутся в одной точке — центре тяжести тела.

Точка O , в которой находится центр тяжести тела в однородном поле силы тяжести, обладает еще одним замечательным свойством. Если к свободному телу массой m приложена сила $\vec{F}$, проходящая через эту точку, то тело движется поступательно и ускорение $\vec{a}$ любой точки тела равно:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}.$$

Как показывает опыт, в любом теле имеется только одна точка O , через которую

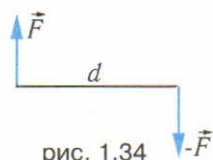


рис. 1.34

проходят линии приложения всех сил, вызывающих поступательное движение тела. Если же вектор силы $\vec{F}$ не проходит через точку O , то тело перемещается в пространстве и вращается вокруг оси, проходящей через эту точку. При этом ускорение a точки O определяется по второму закону Ньютона так же, как и в первом случае, а ускорения всех остальных точек можно найти только с учетом вращения тела, т. е. эта точка всегда движется так, как будто в ней сосредоточена вся масса тела. Поэтому точку O называют *центром масс* тела.

Если вектор силы $\vec{F}$ не проходит через центр масс тела, то, кроме движения центра масс с ускорением a , происходит вращение тела с угловым ускорением ε вокруг оси, проходящей через центр масс и перпендикулярной плоскости, проходящей через вектор $\vec{F}$ и центр масс. Угловое ускорение ε вращения тела определяется основным уравнением динамики вращательного движения:

$$\varepsilon = \frac{M}{I},$$

где M — момент силы F относительно оси вращения тела; I — момент инерции тела относительно этой оси.

Понятие о центре масс имеет смысл для любой механической системы и не связано ни с каким силовым полем, а понятие центра тяжести связано с действием на систему гравитационного поля. Однако в случае однородного гравитационного поля положение центра тяжести любой системы тел совпадает с положением ее центра масс. С помощью понятия «центр масс» можно обобщить первый закон Ньютона — закон инерции: если на замкнутую систему тел не действуют внешние силы, то центр масс этой системы движется равномерно и прямолинейно. Следовательно, центр масс замкнутой системы тел движется с постоянной скоростью. Если же в начальный момент времени суммарный импульс системы был равен нулю, то положение центра масс данной системы тел не изменяется, какие бы изменения в расположении тел ни происходили. Этот факт позволяет решать многие задачи, не прибегая к закону сохранения импульса.

Заметим, что центр масс в общем случае может не совпадать ни с одним из тел замкнутой системы. В частном случае, когда система состоит из двух тел, центр масс лежит на прямой, соединяющей эти тела, и делит расстояния между ними в отношении, обратном отношению масс.

■ Вопросы

1. Сформулируйте условия равновесия твердого тела. 2. Какая точка называется центром тяжести? 3. Как можно определить координаты центра тяжести тела? 4. Какая точка называется центром масс тела? 5. Как можно

экспериментально определить положение центра масс твердого тела? 6. В каких случаях центр масс и центр тяжести тела совпадают?

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1. Два человека одинакового роста держат на плечах за концы в горизонтальном положении трубу длиной 2 м и массой 10 кг. На расстоянии 0,5 м от первого человека к трубе подвешен груз массой 100 кг. Определите силы, с которыми труба давит на плечи первого и второго человека. Можно ли по данным задачи рассчитать силы давления трубы на плечи, если ее будут нести не два, а три человека?

Решение. В рассматриваемой задаче все векторы сил параллельны оси ординат, поэтому уравнения равновесия имеют вид: $\sum F_y = 0$, $\sum M = 0$.

Выбрав ось, проходящую через точку А (рис. 1.35), запишем условия равновесия:

$$N_1 + N_2 - m_1 g - m_2 g = 0, \\ m_2 g AC + m_1 g AO - N_2 AB = 0$$

(здесь N_1 и N_2 — силы, действующие на трубы).

Отсюда найдем:

$$N_2 = \frac{m_2 g AC + m_1 g AO}{AB}.$$

Полагая $g = 10 \text{ м/с}^2$, получим

$$N_2 = \frac{100 \cdot 10 \cdot 0,5 + 10 \cdot 10 \cdot 1}{2} \text{ Н} = 300 \text{ Н},$$

$$N_1 = (m_1 + m_2)g - N_2 = [(100 + 10) \cdot 10 - 300] \text{ Н} = 800 \text{ Н}.$$

Чтобы проверить полученный ответ, определим модуль силы N_1 , применив правило моментов относительно точки В:

$$N_1 AB - m_2 g BC - m_1 g OB = 0, \quad N_1 = \frac{m_2 g BC + m_1 g OB}{AB} = \\ = \frac{100 \cdot 10 \cdot 1,5 + 10 \cdot 10 \cdot 1}{2} \text{ Н} = 800 \text{ Н}.$$

В соответствии с третьим законом Ньютона труба давит на плечи с силами $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$, равными по модулю, но противоположно направленными силам $\vec{N}_1$ и $\vec{N}_2$. Следовательно, $F_1 = 800 \text{ Н}$, $F_2 = 300 \text{ Н}$.

Для случая, когда трубу несут три человека, независимых уравнений получается два, а неизвестных сил реакции опор три. Расчет трех сил в рамках модели «труба — абсолютно твердое тело» невыполним.

Задача 2. Балка длиной l и массой 120 кг висит на трех шнурах одинаковой жесткости (как показано на рисунке 1.36, а). Центр масс балки отстоит от первого шнура на расстоянии $l/4$. Определите силы натяжения шнуров.

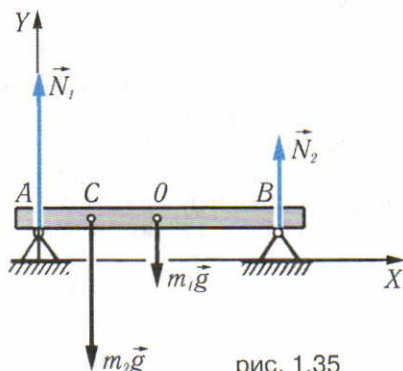


рис. 1.35

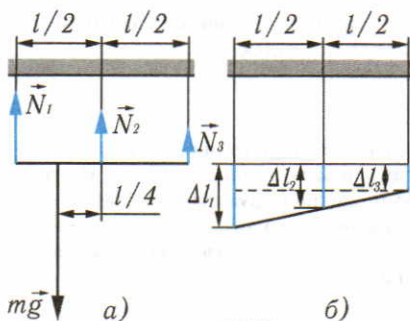


рис. 1.36

Решение. На балку действуют сила тяжести $m\vec{g}$ и силы натяжения нитей $\vec{N}_1$, $\vec{N}_2$, $\vec{N}_3$ (рис. 1.36, а). Поскольку все эти силы параллельны, уравнений равновесия только два:

$$N_1 + N_2 + N_3 - mg = 0 \quad (1)$$

и

$$N_2 \frac{l}{2} + N_3 l - mg \frac{l}{4} = 0 \quad (2)$$

(относительно оси, проходящей через левый конец балки).

Так как общее число сил реакции больше числа уравнений, содержащих эти силы, то данная система является статически неопределимой. В этом случае модель абсолютно твердого тела оказывается непригодной и при решении задачи необходимо учитывать деформацию тел, применив закон Гука.

Обозначив растяжения шнуров Δl_1 , Δl_2 , Δl_3 и используя закон Гука

$$N_1 = k\Delta l_1, \quad N_2 = k\Delta l_2, \quad N_3 = k\Delta l_3, \quad (3)$$

получим третье условие равновесия (см. рис. 1.36, б):

$$\frac{\Delta l_1 - \Delta l_3}{\Delta l_2 - \Delta l_3} = \frac{l}{l/2} = 2. \quad (4)$$

Из выражений (3) и (4) следует:

$$N_1 + N_3 = 2N_2. \quad (5)$$

Решая уравнения (1) — (5), получим

$$N_1 = \frac{7}{12} mg = \frac{7}{12} \cdot 120 \cdot 10 \text{ Н} = 700 \text{ Н},$$

$$N_2 = \frac{mg}{3} = \frac{1}{3} \cdot 120 \cdot 10 \text{ Н} = 400 \text{ Н},$$

$$N_3 = \frac{mg}{12} = \frac{1}{12} \cdot 120 \cdot 10 \text{ Н} = 100 \text{ Н}.$$

Задачи для самостоятельного решения

7.1. Балка длиной 8 м и массой 100 кг расположена горизонтально и покоится на двух опорах. $AM = 3$ м, $MN = 3$ м, $NB = 2$ м. На расстоянии 2 м от левого конца балки подвешен груз массой 40 кг. Определите силы, с которыми балка давит на опоры (рис. 1.37).

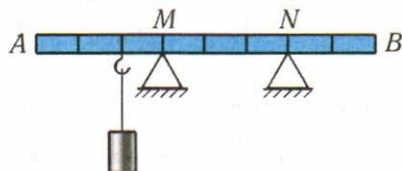


рис. 1.37

7.2. Однородный стержень массой 0,1 кг укреплен одним концом в шарнире и удерживается в равновесии с помощью нити, прикрепленной к другому его концу. Угол α между стержнем и вертикальным направлением равен 30° . Найдите силы натя-

жения нити и реакции шарнира, если нить расположена горизонтально (рис. 1.38).

7.3. Лестница массой m прислонена к стене. Чему равен минимальный угол φ между лестницей и полом, при котором лестница еще находится в равновесии, если коэффициент трения между лестницей и стенкой равен μ_1 , а между лестницей и полом μ_2 ? Определите силы реакции и силы трения между лестницей, полом и стенкой.

7.4. Цилиндр радиусом R имеет цилиндрическую полость радиусом r , ось которой расположена параллельно оси цилиндра и смещена относительно нее на расстояние l . Цилиндр положили на наклонную плоскость. Найдите максимальный угол наклона плоскости, при котором цилиндр еще не скатывается.

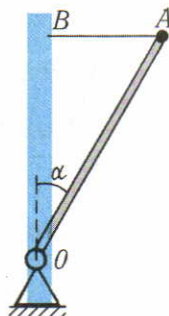


рис. 1.38

§ 8 Закон сохранения импульса

Основную задачу механики — определение положения тела в любой момент времени — можно решить с помощью законов Ньютона, если заданы начальные условия и силы, действующие на тело, как функции координат, скоростей и времени. На практике эти зависимости не всегда известны. Однако многие задачи в механике можно решить, не зная значений сил, действующих на тело. Это возможно потому, что существуют величины, характеризующие механическое движение тел, которые сохраняются при определенных условиях. Если известны положение тела и его скорость в какой-то момент времени, то при помощи сохраняющихся величин можно определить положение и скорость этого тела после любого взаимодействия, не прибегая к законам динамики.

Сохраняющимися величинами в механических процессах являются импульс, момент импульса и энергия.

Импульс тела. Изменение скорости $\vec{v}$ тела под действием постоянной силы $\vec{F}$ за интервал времени Δt равно:

$$\Delta \vec{v} = \vec{a} \Delta t = \frac{\vec{F} \Delta t}{m}. \quad (8.1)$$

Уравнение (8.1) показывает, что изменение скорости движения тела прямо пропорционально не только силе, но и времени ее действия.

Физическая величина, равная произведению силы $\vec{F}$ на время Δt ее действия, называется *импульсом силы*.

Из формулы (8.1) следует, что произведение изменения скорости тела на его массу равно импульсу силы:

$$m \Delta \vec{v} = \vec{F} \Delta t \quad (8.2)$$

или

$$\Delta(m\vec{v}) = \vec{F} \Delta t. \quad (8.3)$$

Физическая величина, равная произведению массы тела на скорость его движения, называется *импульсом тела*.

Изменение импульса тела равно импульсу силы, вызывающей это изменение. Иногда импульс тела называют *количеством движения*. Импульс тела обозначается латинской буквой $\vec{p}$:

$$\vec{p} = m\vec{v}. \quad (8.4)$$

За единицу импульса в Международной системе принят импульс тела массой 1 кг, движущегося со скоростью 1 м/с.

Закон сохранения импульса. При взаимодействии тел скорость и импульс каждого из них изменяются. Система тел, на которые не действуют внешние силы или сумма всех внешних сил равна нулю, называется *замкнутой системой*. Экспериментально установлено, что в любой инерциальной системе отсчета в замкнутой системе тел сумма векторов импульсов тел до их взаимодействия всегда равна сумме векторов импульсов тел после взаимодействия:

$$\sum \vec{p}_i = \text{const}. \quad (8.5)$$

Постоянство суммы векторов импульсов при любых взаимодействиях тел является универсальным законом природы. Этот закон является одним из основных или фундаментальных законов физики и называется *законом сохранения импульса*: в замкнутой системе тел сумма векторов импульсов тел остается постоянной при любых взаимодействиях тел между собой.

Если сумма векторов импульсов взаимодействующих тел остается постоянной, то сумма изменений импульсов взаимодействующих тел равна нулю:

$$\sum \Delta \vec{p}_i = 0. \quad (8.6)$$

К незамкнутым системам тел закон сохранения импульса не применим, однако постоянными остаются проекции импульса на координатные оси, в направлении которых сумма проекций приложенных внешних сил равна нулю.

В неинерциальных системах отсчета при отсутствии взаимодействия тел скорости движения тел изменяются со временем. Поэтому импульс любого тела при отсутствии взаимодействия с другими телами не остается постоянным, если выбрана неинерциальная система отсчета. Следовательно, необходимым условием применимости закона сохранения импульса к замкнутой системе взаимодействующих тел является выбор инерциальной системы отсчета. В неинерциальных системах отсчета закон сохранения импульса не выполняется.

Движение тел переменной массы. Рассмотрим в качестве примера действие реактивного двигателя. При сгорании топлива в камере сгорания ракеты образуются газы, нагретые до высокой температуры. Эти газы вырываются из сопла со

скоростью $\vec{u}$ относительно ракеты (рис. 1.39; на рисунке цифрами обозначено: 1 — топливо; 2 — окислитель). Эту скорость называют *скоростью истечения*. Пренебрегая взаимодействием ракеты с внешними телами, будем считать систему тел «ракета — газы» замкнутой.

Пусть в момент времени $t_0 = 0$ ракета массой m двигалась со скоростью $\vec{V}_0$. За малый промежуток времени Δt из ракеты выбрасывается масса газа Δm со скоростью $\vec{u}$ относительно ракеты, т. е. со скоростью $\vec{V}_1 = \vec{u} + \vec{v}$ относительно инерциальной системы отсчета (здесь v — скорость ракеты через Δt). По закону сохранения импульса имеем

$$m\vec{V}_0 = (m - \Delta m)\vec{v} + \Delta m\vec{V}_1.$$

Подставив значения $\vec{V}_1 = \vec{u} + \vec{v}$ и $\vec{v} = \vec{V}_0 + \Delta\vec{v}$, получим

$$m\Delta\vec{v} = -\Delta m\vec{u}. \quad (8.7)$$

Разделим обе части равенства на промежуток времени Δt , в течение которого работали двигатели ракеты:

$$m(\Delta\vec{v}/\Delta t) = -(\Delta m/\Delta t)\vec{u}.$$

Перейдя к пределу при $\Delta t \rightarrow 0$ и учитывая, что $\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t} = \vec{a}$ есть уско-

рение ракеты, а $\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta t} = \mu$ есть расход топлива в единицу времени, получим

$$m\vec{a} = -\mu\vec{u}.$$

Произведение массы ракеты m на ускорение ее движения $\vec{a}$ называется *реактивной силой тяги*:

$$\vec{F}_p = m\vec{a} = -\mu\vec{u}. \quad (8.8)$$

Таким образом, мы показали, что модуль реактивной силы тяги $\vec{F}_p$ равен произведению модуля скорости $\vec{u}$ истечения газов относительно ракеты на секундный расход топлива μ .

Реактивная сила тяги действует со стороны истекающих газов на ракету и направлена в сторону, противоположную направлению истечения газов.

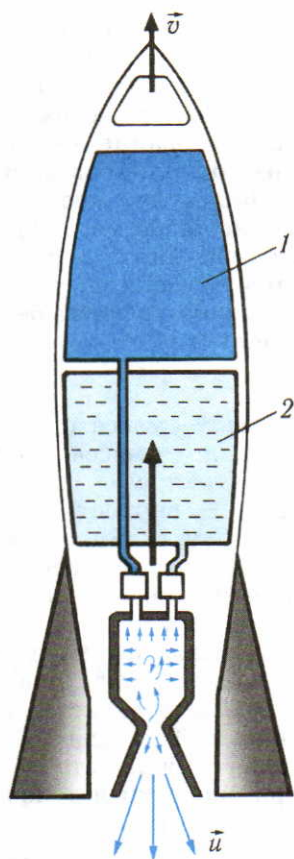


рис. 1.39

Особенности реактивных двигателей. Реактивные двигатели широко используют в современной технике. Возможность межпланетных полетов с применением ракетных кораблей впервые была доказана К. Э. Циолковским в работе «Исследование мировых пространств реактивными приборами», опубликованной в 1903 г.

Формулу, дающую возможность определить массу топлива, необходимого для сообщения ракете заданной скорости, а также найти максимальную скорость ракеты при заданном запасе топлива, получил К. Э. Циолковский. Для случая движения ракеты без учета влияния силы тяжести формула Циолковского имеет вид

$$m_0/m = e^{v/u} = 10^{0,4343v/u}, \quad (8.9)$$

где m_0 — масса ракеты с топливом перед включением двигателя; m — масса ракеты без топлива при окончании работы двигателя; u — скорость истечения газов относительно ракеты; v — скорость ракеты к концу работы двигателя. Символом $e = 2,71826...$ обозначено число, представляющее собой непериодическую бесконечную десятичную дробь, принятую в математике как наиболее удобное основание показательной функции¹.

Анализ формулы Циолковского приводит к выводу, что расход топлива, необходимого для достижения заданной скорости, определяется скоростью истечения газов относительно ракеты. Так, для достижения ракетой скорости 8000 м/с, которая нужна для запуска искусственного спутника Земли, при скорости истечения газов 1000 м/с отношение массы ракеты с топливом m_0 к массе ракеты без топлива m равно:

$$m_0/m = e^8 = 10^{3,4744} = 2981 \approx 3000.$$

Для достижения ракетой этой же скорости при истечении газов со скоростью 4000 м/с искомое отношение масс равно:

$$m_0/m = e^2 = 10^{0,8686} = 7,389 \approx 7,4.$$

Если учесть, что скорость 4000 м/с — это почти максимальное значение скорости истечения газов при использовании энергии химических реакций окисления топлива, то становится ясным, какие серьезные трудности встают перед конструкторами космических ракет. Например, масса керосина в обычной цистерне лишь в 13 раз превосходит массу цистерны. Но ведь ракета не может быть простой цистерной с горючим! Нужны еще и окислитель, и камера сгорания, система насосов и трубопроводов, механизмы управления работой двигателя и полетом ракеты, должна, наконец, ракета

¹ Выражение (8.9) можно получить, проинтегрировав уравнение (8.7), записанное в дифференциальной форме $mdv = -udm$.

нести в космическое пространство и полезную нагрузку в виде автоматической научной аппаратуры или космонавтов и системы их жизнеобеспечения.

Решение трудной задачи достижения ракетами космических скоростей нашел К. Э. Циолковский, предложив использование многоступенчатых ракет. Ступени ракеты отделяются по мере выгорания топлива, находящегося в них, а за счет уменьшения оставшейся массы при той же относительной скорости истечения газов увеличивается максимально достижимая скорость многоступенчатой ракеты.

■ Вопросы

1. Что называется импульсом тела? 2. Какая система тел называется замкнутой? 3. Как формулируется закон сохранения импульса? 4. Может ли ракетный двигатель разгонять ракету за пределами земной атмосферы? 5. Почему для запуска космических кораблей используются многоступенчатые ракеты?

■ Задачи для самостоятельного решения

8.1. Определите ускорение ракеты массой $m = 10^6$ кг через 1 мин после старта при секундном расходе топлива $\mu = 7,5 \cdot 10^3$ кг/с. Скорость истечения газов относительно ракеты постоянна и равна $u = 2 \cdot 10^3$ м/с. Ракета движется вертикально вверх.

8.2. Масса ракеты с топливом $m_0 = 10^6$ кг. Рассчитайте расход топлива, необходимый для достижения ракетой первой космической скорости $v = 8 \cdot 10^3$ м/с, если скорость газовой струи относительно ракеты равна $u = 4 \cdot 10^3$ м/с.

8.3. Снаряд разорвался на два осколка одинаковой массы. Скорости осколков равны по модулю $v_1 = 300$ м/с и $v_2 = 400$ м/с и направлены перпендикулярно друг другу. Найдите скорость снаряда до разрыва.

8.4. На одном конце неподвижной длинной тележки массой $m_1 = 25$ кг стоит мальчик массой $m_2 = 50$ кг. С какой скоростью будет двигаться тележка, если он побежит со скоростью $v = 3$ м/с относительно тележки?

8.5. Чему равен секундный расход топлива в момент старта ракеты массой $m = 10^6$ кг, если она стартует вертикально с ускорением $a = 3$ м/с²? Скорость истечения газов относительно ракеты равна $u = 4 \cdot 10^3$ м/с.

§ 9 Закон сохранения момента импульса

Момент импульса. Основное уравнение динамики вращательного движения тела под действием постоянного момента силы $M = \text{const}$ можно представить в виде

$$M = I\varepsilon = I \frac{\omega_2 - \omega_1}{\Delta t},$$

откуда

$$M\Delta t = I\omega_2 - I\omega_1. \quad (9.1)$$

Как показывает опыт, если момент инерции тела изменяется, то уравнение динамики вращающегося тела можно записать в более общем виде:

$$M\Delta t = \Delta(I\omega).$$

Произведение момента инерции тела на угловую скорость его вращения называется *моментом импульса*:

$$L = I\omega.$$

Закон сохранения момента импульса. Момент импульса — одна из важнейших характеристик вращательного движения тела.

Когда суммарный момент сил, действующих на тело, относительно данной оси вращения равен нулю ($M=0$), то

$$\Delta L = \Delta(I\omega) = 0,$$

т. е. момент импульса не изменяется:

$$L = I\omega = \text{const.} \quad (9.5)$$

Это и есть *закон сохранения момента импульса*.

Закон сохранения момента импульса справедлив не только для одного тела, но и для любой замкнутой системы тел.

Эффектной демонстрацией закона сохранения момента импульса является опыт с использованием вращающейся скамьи.

На скамью, имеющую вертикальную ось вращения (или легко вращающийся стул), встает человек, берет в руки гантели или тяжелые гири и разводит руки в стороны. Скамью с человеком приводят во вращение (рис. 1.40, а). Если человек опускает руки и прижимает их к туловищу (рис. 1.40, б), то его момент инерции существенно уменьшается, а угловая скорость вращения увеличивается; если снова разводит руки, то угловая скорость вращения вновь уменьшается.

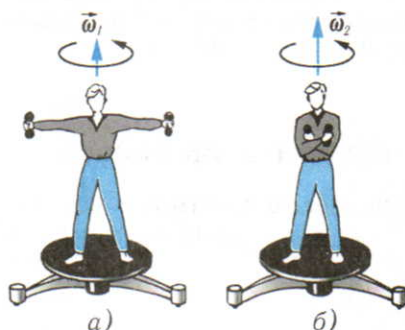


рис. 1.40

Закон сохранения момента импульса используют спортсмены, артисты балета и цирка (сальто, волчок на льду и т. п.).

Замечательной особенностью вращательного движения является свойство вращающихся тел при отсутствии взаимодействий с другими телами сохранять неизменными не только момент импульса, но и направление оси вращения в пространстве. Неизменным ориентиром для

путешественников на поверхности Земли служит Полярная звезда. Примерно на эту звезду направлена ось вращения Земли, и кажущаяся неподвижность Полярной звезды на протяжении столетий наглядно доказывает, что в течение этого времени направление оси вращения Земли в пространстве не изменилось.

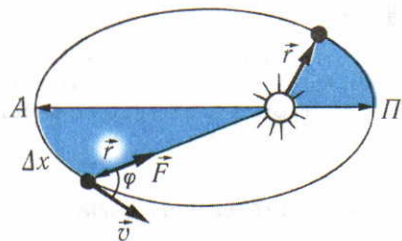


рис. 1.41

Эффект сохранения направления оси вращения в пространстве используется в приборе, называемом *гироскопом*.

Второй закон Кеплера. Частным случаем закона сохранения момента импульса является второй закон Кеплера, открытый в 1609 г.

Солнце и обращающиеся вокруг него по эллиптическим орбитам планеты образуют замкнутую систему, центр масс которой находится практически в центре Солнца.

Поскольку направление силы тяготения, действующей на планету со стороны Солнца, проходит через фокус орбиты, по которой движется планета, то момент этой силы равен нулю (плечо силы равно нулю); значит, к планете можно применить закон сохранения момента импульса:

$$L = I\omega = mr^2 \frac{v \sin \varphi}{r} = mvr \sin \varphi = \text{const}, \quad (9.6)$$

где φ — угол между векторами $\vec{r}$ и $\vec{v}$ (рис. 1.41).

При $\Delta t \rightarrow 0$ площадь ΔS , описываемая радиус-вектором, равна $\Delta S = r \Delta x \cdot \sin \varphi$ (см. рис. 1.41). Так как $\Delta x = v \Delta t$, то

$$\Delta S = rv \Delta t \sin \varphi.$$

Величина, равная пределу отношения площади ΔS к промежутку времени Δt , т. е.

$$\sigma = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta S}{\Delta t} = rv \sin \varphi, \quad (9.7)$$

называется *секторной скоростью*.

Из выражений (9.6) и (9.7) следует:

$$\sigma = \frac{L}{m} = vr \sin \varphi = \text{const}.$$

Это и есть математическая запись *второго закона Кеплера*: радиус-вектор планеты за любые равные промежутки времени описывает равные площади.

Вопросы

1. Что называют моментом импульса? 2. Как связаны изменения момента импульса тела с моментом силы? 3. При каких условиях момент импульса тела остается неизменным? 4. Могут ли внутренние силы изменить угловую скорость системы?

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Задача. Считая Солнце однородным шаром, оцените минимальный радиус и период вращения вокруг своей оси пульсара, который мог бы образоваться после сжатия Солнца под действием силы тяготения при исчерпании внутренних источников энергии, поддерживающих высокую температуру газа. Радиус Солнца $R_C = 7 \cdot 10^8$ м, период вращения вокруг оси $T_C = 2,2 \cdot 10^6$ с. Масса Солнца равна $M_C = 2 \cdot 10^{30}$ кг.

Решение. Запишем закон сохранения момента импульса для Солнца до и после превращения его в пульсар:

$$I_C \omega_C = I_{\pi} \omega_{\pi}.$$

Учитывая, что момент инерции шара равен $I = 0,4 m R^2$, получим

$$0,4 M_C R_C^2 \cdot \frac{2\pi}{T_C} = 0,4 M_C R_{\pi}^2 \cdot \frac{2\pi}{T_{\pi}}.$$

Отсюда период обращения пульсара вокруг своей оси равен:

$$T_{\pi} = T_C \frac{R_C^2}{R_{\pi}^2}. \quad (1)$$

Второе соотношение между периодом и радиусом пульсара получим из условия, что сила тяготения обеспечивает вращение вещества пульсара с заданным периодом ($F_{\text{тяг}} \geq m a_{\text{цс}}$):

$$G \frac{m M_C}{R_{\pi}^2} \geq m \frac{4\pi^2}{T_{\pi}^2} R_{\pi}$$

откуда следует:

$$\frac{R_{\pi}^3}{T_{\pi}^2} \leq \frac{G M_C}{4\pi^2}. \quad (2)$$

Из уравнений (1) и (2) получим

$$R_{\pi} \geq \frac{4\pi^2 R_C^4}{G M_C T_C^2} \approx 15 \text{ км}, \quad T_{\pi} \approx 10^{-3} \text{ с.}$$

Задачи для самостоятельного решения

9.1. Комета Галлея движется вокруг Солнца по вытянутому эллипсу, причем наибольшее удаление кометы от Солнца равно 35,2 а. е., а наименьшее удаление от Солнца — 0,6 а. е. (1 а. е. — астрономическая единица длины, равная расстоянию от Земли до Солнца; 1 а. е. = $1,5 \cdot 10^{11}$ м). Найдите отношение максимальной скорости кометы к минимальной.

9.2. Человек стоит на вращающейся с некоторой угловой скоростью платформе. В вытянутых в сторону руках он держит по гире, масса каждой из них $m = 5$ кг. Расстояние от гирь до оси вращения $R_1 = 0,71$ м. Во сколько раз изменится частота вращения человека, если он прижмет к себе руки так, что расстояние от оси вращения до гирь станет $R_2 = 0,2$ м? Момент инерции человека считайте в обоих случаях равным $I = 1$ кг $\cdot$ м².

9.3. Человек массой $m_1 = 60$ кг находится на неподвижной круглой платформе радиусом $R_2 = 10$ м и массой $m_2 = 120$ кг, которая может вращаться вокруг своей вертикальной оси. С какой угловой скоростью будет вращаться платформа, если человек станет двигаться по окружности радиусом $R_1 = 5$ м с линейной скоростью $v_1 = 2$ м/с относительно платформы?

§ 10 Закон сохранения энергии в механических процессах

Энергия. Открытие закона сохранения импульса показало, что механическое движение тел имеет количественную меру, сохраняющуюся при любых взаимодействиях тел. Этой мерой является импульс. Однако с помощью только этой меры движения не удается дать полное объяснение всех закономерностей взаимодействия тел.

Рассмотрим такой пример. Два одинаковых автомобиля движутся навстречу друг другу с одинаковыми скоростями. Что произойдет при их столкновении? Если они только остановятся, то сумма их импульсов до столкновения и после столкновения одинакова и равна нулю — закон сохранения импульса выполняется. Если бы автомобили при столкновении могли только остановиться без каких-либо других изменений в них, то это означало бы, что механическое движение при взаимодействии тел может исчезать бесследно. Но природа устроена иначе: в ней никогда и нигде механическое движение тел не возникает само собой, никогда и ни при каких взаимодействиях механическое движение тел не исчезает бесследно.

Что же происходит с автомобилями при их столкновении, кроме изменения скоростей движения? Автомобили деформируются и разрушаются, температура деформируемых деталей повышается. Изменение температуры тела свидетельствует об изменениях скоростей хаотического теплового движения атомов, из которых состоит тело. Следовательно, механическое движение не исчезло бесследно, оно превратилось в другую форму движения материи. Имеется ли в природе мера движения материи, сохраняющаяся при любых превращениях одной формы движения в другую? Опыты и наблюдения показали, что такая мера движения в природе существует. Ее называли *энергией*.

Энергией называется физическая величина, являющаяся количественной мерой различных форм движения материи.

Для точного определения энергии как физической величины необходимо найти ее связь с другими величинами, выбрать единицу и найти способы ее измерения.

Механической энергией называется физическая величина, являющаяся количественной мерой механического движения тел при его превращениях в другие формы движения.

Кинетическая энергия. В качестве меры поступательного движения тел нужно найти физическую величину, одинаковую у различных поступательно движущихся тел при одинаковом изменении какой-либо другой формы движения, превращающейся в механическое поступательное движение. Для передачи разным телам одинаковой энергии можно, например, использовать пружину. Опыт показывает, что одинаково сжатая стальная пружина сообщает телам с разными массами $m_1, m_2, \dots, m_n$ такие скорости $v_1, v_2, \dots, v_n$, что произведение массы тела на квадрат скорости для всех тел оказывается одинаковым. Следовательно, величина mv^2 может служить количественной мерой поступательного движения тел при превращениях других форм движения в поступательное механическое движение или поступательного механического движения в другие формы движения. В физике в качестве количественной меры поступательного механического движения при возникновении его из других форм движения или превращении в другие формы движения принята величина, равная половине произведения массы тела на квадрат скорости его движения. Эта физическая величина называется *кинетической энергией* тела и обозначается E_k :

$$E_k = \frac{mv^2}{2}. \quad (10.1)$$

Так как скорость является величиной, зависящей от выбора системы отсчета, значение кинетической энергии тела зависит от выбора системы отсчета.

Кинетическая энергия вращающегося тела. Кинетической энергией обладают не только тела, движущиеся поступательно, но и любые вращающиеся тела.

Кинетическая энергия вращающегося тела равна сумме кинетических энергий отдельных его частей:

$$E_k = \frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} + \dots$$

Так как угловые скорости всех точек вращающегося твердого тела одинаковы, то $v_1 = \omega r_1, v_2 = \omega r_2, \dots$

Следовательно,

$$E_k = \frac{m_1 \omega^2 r_1^2}{2} + \frac{m_2 \omega^2 r_2^2}{2} + \dots = \frac{\omega^2}{2} (m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2 + \dots).$$

Величина, стоящая в скобках (сумма моментов инерции всех

точек твердого тела), есть момент инерции I тела относительно оси вращения.

Тогда формулу для кинетической энергии вращающегося тела можно записать в виде

$$E_k = \frac{I\omega^2}{2}.$$

Работа. Любое изменение скорости поступательного движения тела и его кинетической энергии E_k происходит в результате взаимодействия с другими телами. Используя второй закон Ньютона, установим связь изменений кинетической энергии тела с действующими на тело силами. Вычислим изменение кинетической энергии E_k тела массой m за время t при действии на него постоянной силы F . Если в начальный момент времени скорость тела равна нулю, то направление вектора скорости $\vec{v}$ тела в любой момент времени совпадает с направлением вектора равнодействующей силы $\vec{F}$ (рис. 1.42). Начальное значение кинетической энергии равно нулю, в момент времени t , когда скорость достигает значения v , кинетическая энергия тела равна $\frac{mv^2}{2}$, изменение кинетической энергии равно:

$$\Delta E_k = \frac{mv^2}{2}. \quad (10.2)$$

Значение скорости v тела определяется выражением

$$v = at \quad (10.3)$$

или

$$v = \frac{Ft}{m}. \quad (10.4)$$

Используя выражения (10.2) — (10.4), изменение кинетической энергии ΔE_k тела под действием силы F можно представить в следующем виде:

$$\Delta E_k = \frac{mat \frac{F}{m}}{2} = F \frac{at^2}{2} = Fs. \quad (10.5)$$

Физическая величина, равная изменению кинетической энергии тела в результате действия на него силы, называется *работой силы*. Работа обозначается буквой A :

$$A = \Delta E_k. \quad (10.6)$$

Мы получили, что при совпадении направления вектора силы с направлением вектора скорости тела работа силы равна произведению модуля силы и пути, пройденного телом:

$$A = Fs. \quad (10.7)$$

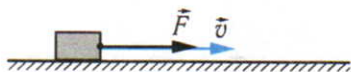


рис. 1.42

За единицу работы в Международной системе принимается работа, совершаемая силой 1 Н на пути 1 м при движении по направлению вектора силы. Эта единица называется джоуль (1 Дж).

Так как работа равна изменению энергии, единица энергии в СИ совпадает с единицей работы — 1 Дж.

Работа силы, направленной под углом к вектору скорости. Найдем изменение кинетической энергии тела в случае, когда вектор равнодействующей силы направлен под углом к вектору скорости. Начнем с рассмотрения частного случая. Если вектор силы перпендикулярен вектору скорости, тело движется равномерно по окружности. Сила является причиной изменения направления вектора скорости и возникновения центростремительного ускорения. При равномерном движении тела по окружности модуль его скорости не изменяется, следовательно, не изменяется и кинетическая энергия тела. Если равно нулю изменение кинетической энергии тела, то равна нулю и работа силы:

$$\Delta E_k = 0, \quad A = \Delta E_k = 0.$$

Если вектор силы направлен под углом 90° к вектору скорости тела, то работа силы на любом пути равна нулю.

Рассмотрим теперь общий случай. Пусть к телу приложена сила, направленная под углом α к вектору скорости тела. Вектор силы $\vec{F}$ можно представить как равнодействующую двух векторов сил $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ (рис. 1.43). Вектор силы $\vec{F}_1$ направлен перпендикулярно вектору скорости $\vec{v}$ тела, вектор силы $\vec{F}_2$ направлен параллельно вектору скорости $\vec{v}$ тела. Под действием силы $\vec{F}_1$, направленной перпендикулярно вектору скорости, кинетическая энергия тела не изменяется. Изменение кинетической энергии тела происходит только под действием силы $\vec{F}_2$, параллельной вектору скорости. Поэтому изменение кинетической энергии тела определяется выражением

$$\Delta E_k = F_2 s. \quad (10.8)$$

Значение составляющей силы F_2 равно:

$$F_2 = F \cos \alpha, \quad (10.9)$$

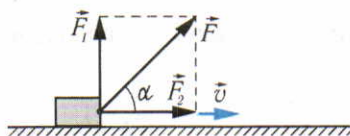


рис. 1.43

поэтому изменение кинетической энергии равно:

$$\Delta E_k = F s \cos \alpha,$$

следовательно,

$$A = F s \cos \alpha. \quad (10.10)$$



рис. 1.44

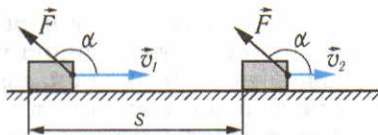


рис. 1.45

Если вектор силы направлен под углом α к вектору скорости тела, то работа силы равна произведению модуля силы, пути и косинуса угла между векторами силы и скорости.

В зависимости от значения угла между векторами силы и скорости работа может иметь положительное или отрицательное значение. Если угол α лежит в пределах $0^\circ \leq \alpha < 90^\circ$, то работа силы положительна (рис. 1.44). В результате совершения этой работы кинетическая энергия тела увеличивается ($v_2 > v_1$). Если же угол лежит в пределах $90^\circ < \alpha \leq 180^\circ$, то работа силы отрицательна (рис. 1.45). В результате совершения этой работы кинетическая энергия тела уменьшается ($v_2 < v_1$). В случае $\alpha = 90^\circ$ работа силы равна нулю.

Работа силы тяжести. При перемещении тела вниз по наклонной плоскости (рис. 1.46) работа силы тяжести равна:

$$A = mgs \cos \alpha = mgh, \quad (10.11)$$

где h — высота наклонной плоскости; s — длина наклонной плоскости. Движение тела в поле силы тяжести из точки B в точку C по любой траектории можно мысленно представить состоящим из перемещений по наклонным отрезкам (рис. 1.47). Работа A силы тяжести на всем пути из точки B в точку C равна сумме работ на отдельных участках пути. Если на всем пути ускорение силы тяжести можно считать одинаковым, то эта работа равна:

$$A = mg\Delta h_1 + mg\Delta h_2 + \dots + mg\Delta h_n = mg(h_B - h_C), \quad (10.12)$$

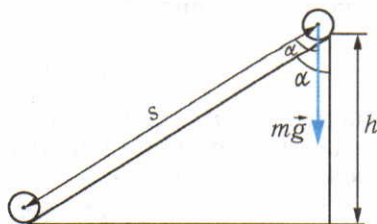


рис. 1.46

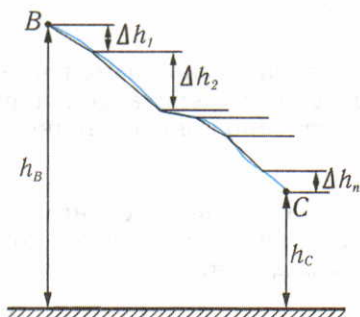


рис. 1.47

где h_B и h_C — высоты от поверхности Земли, на которых расположены соответственно точки B и C .

Равенство (10.12) показывает, что работа постоянной силы тяжести не зависит от траектории движения тела и всегда равна произведению модуля силы тяжести на разность высот в начальном и конечном положениях. При движении вниз работа силы тяжести положительна, при движении вверх отрицательна.

Если после движения по какой-либо траектории тело возвращается в исходную точку, то начальное h_1 и конечное h_2 значения высоты совпадают и работа силы тяжести оказывается равной нулю. Следовательно, работа силы тяготения при движении тела по любой замкнутой траектории равна нулю. При строгом решении задачи с учетом зависимости силы тяжести от расстояния до центра Земли получается точно такой же конечный результат.

Потенциальная энергия. Если тело поднято над поверхностью Земли на некоторую высоту и затем свободно падает на Землю, его скорость увеличивается, кинетическая энергия возрастает. Увеличение кинетической энергии тела при свободном падении показывает, что поднятое над Землей тело обладает некоторым запасом энергии. Другой пример — возникновение кинетической энергии поступательного движения тела за счет энергии деформированной пружины. Опыт показывает, что, чем больше деформация пружины, тем большей кинетической энергией будет обладать тело, приводимое в движение этой пружинной.

Энергия, которая зависит только от взаимного расположения тел или от взаимного расположения частей одного тела, называется *потенциальной энергией*.

В процессе свободного падения тела на Землю его кинетическая энергия возрастает ровно на столько, на сколько уменьшается потенциальная энергия. Поэтому изменение кинетической энергии ΔE_k равно изменению потенциальной энергии ΔE_p , взятому с противоположным знаком:

$$\Delta E_k = -\Delta E_p.$$

Следовательно, изменение потенциальной энергии равно работе равнодействующей приложенных к телу сил, взятой с противоположным знаком:

$$\Delta E_p = -A. \quad (10.13)$$

Поэтому при свободном падении тела массой m вниз на расстояние h в случае, когда силу тяжести можно считать постоянной, изменение потенциальной энергии равно:

$$\Delta E_p = -mgh. \quad (10.14)$$

Значение потенциальной энергии тела, поднятого над

Землей, зависит от выбора начала отсчета. Обычно принимают, что потенциальная энергия тела равна нулю на поверхности Земли. В этом случае на небольших расстояниях от поверхности Земли, т. е. при условии $g = \text{const}$, потенциальная энергия E_p тела, находящегося на высоте h над поверхностью Земли, равна произведению массы m тела, ускорения свободного падения g и расстояния h от поверхности Земли:

$$E_p = mgh. \quad (10.15)$$

В отличие от кинетической энергии поступательного движения, которая может иметь лишь положительные значения, потенциальная энергия может иметь как положительные, так и отрицательные значения. При отсчете высоты от поверхности Земли тело массой m на глубине h ниже поверхности Земли обладает потенциальной энергией, имеющей отрицательное значение:

$$E_p = -mgh. \quad (10.16)$$

Потенциальная энергия упругой деформации. Найдем изменение потенциальной энергии упругой деформации при восстановлении формы упруго деформированного тела. При восстановлении формы пружины сила упругости линейно убывает до нуля, ее среднее значение на пути x равно полусумме начального и конечного значений:

$$F_{\text{ср}} = \frac{F_1 + F_2}{2} = \frac{kx + 0}{2} = \frac{kx}{2}. \quad (10.17)$$

Работа A силы упругости равна:

$$A = F_{\text{ср}} x, \quad A = \frac{kx}{2} x = \frac{kx^2}{2}. \quad (10.18)$$

Из выражений (10.13) и (10.18) для изменения потенциальной энергии ΔE_p упругой деформации получаем выражение

$$\Delta E_p = -\frac{kx^2}{2}. \quad (10.19)$$

Изменение потенциальной энергии ΔE_p упругой деформации равно разности значений потенциальной энергии в конечном и начальном состояниях:

$$\Delta E_p = E_{p_2} - E_{p_1}.$$

Если в конечном состоянии потенциальная энергия упругой деформации равна нулю $E_{p_2} = 0$, то

$$E_{p_1} = \frac{kx^2}{2}.$$

Потенциальная энергия упругой деформации тела равна половине произведения жесткости k и квадрата деформации x :

$$E_p = \frac{kx^2}{2}. \quad (10.20)$$

Закон сохранения энергии. Любое изменение кинетической энергии тел под действием гравитационных сил или сил упругости можно рассматривать как результат превращения потенциальной энергии взаимодействующих тел в кинетическую или кинетической в потенциальную. При таких превращениях изменение кинетической энергии равно изменению потенциальной энергии, взятому с противоположным знаком [см. формулу (10.13)]:

$$\Delta E_k = -\Delta E_p.$$

Сумма изменений кинетической и потенциальной энергий тел, взаимодействующих гравитационными силами и силами упругости, равна нулю:

$$\Delta E_k + \Delta E_p = 0. \quad (10.21)$$

Следовательно, сумма кинетической и потенциальной энергий тел, взаимодействующих гравитационными силами и силами упругости, остается постоянной:

$$E_k + E_p = \text{const}. \quad (10.22)$$

Сумму кинетической и потенциальной энергий тел называют полной механической энергией E :

$$E = E_k + E_p. \quad (10.23)$$

Полная механическая энергия системы тел, взаимодействующих между собой только силами тяготения и упругости, остается неизменной. Этот опытный факт, подтверждаемый самыми точными экспериментами, называется *законом сохранения механической энергии*. Закон сохранения полной механической энергии является одним из основных законов механики.

Всегда ли уменьшение кинетической энергии тела сопровождается равным по модулю увеличением его потенциальной энергии? Рассмотрим случай торможения и остановки поезда. Кинетическая энергия поезда уменьшилась до нуля, но его потенциальная энергия при этом не изменилась. Следовательно, закон сохранения механической энергии не выполняется, если между телами действуют силы трения. Однако опыт показывает, что механическое движение никогда не исчезает бесследно, никогда оно и не возникает само собой. Во время торможения поезда нагрелись тормозные колодки, колеса и рельсы. Кинетическая энергия поезда не исчезла, а превратилась во внутреннюю энергию теплового движения атомов. Экспериментальный факт, что при любых физических взаимодействиях энергия не возникает и не исчезает, а только превращается из одной формы в другую, называется *законом сохранения и превращения энергии*.

■ Вопросы

1. В каких системах выполняется закон сохранения механической энергии? 2. Чему равна кинетическая энергия вращательного движения твердого тела?

■ ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1. Покажите, что при выборе значения потенциальной энергии тяготения на бесконечно большом расстоянии от тела массой M равным нулю, потенциальная энергия тела массой m в поле тяготения на расстоянии r от тела массой M равна: $E_p = -G \frac{mM}{r}$.

Решение. Если потенциальная энергия тела равна $E_p = -G \frac{mM}{r}$, то изменение потенциальной энергии при перемещении тела на расстояние Δr (от $r_1 = r$ до $r_2 = r + \Delta r$) равно: $\Delta E_p = -G \frac{mM}{r} - \left(-G \frac{mM}{r + \Delta r}\right) = GmM \frac{\Delta r}{r(r + \Delta r)}$. Пренебрегая на малом отрезке Δr зависимостью силы F тяготения от расстояния r , из формулы (10.13) получаем $\Delta E_p = F \Delta r$. Отсюда при условии $\Delta r \rightarrow 0$ получаем $F = -\lim_{\Delta r \rightarrow 0} \frac{\Delta E_p}{\Delta r} = -G \frac{Mm}{r^2}$. Это выражение соответствует закону всемирного тяготения; следовательно, наше предположение о виде зависимости потенциальной энергии от расстояния между взаимодействующими телами справедливо.

Задача 2. Автомобиль движется равноускоренно по горизонтальной дороге и достигает скорости v . Одинакова ли работа, совершаемая двигателем при разгоне из состояния покоя до скорости $\frac{v}{2}$ и от скорости $\frac{v}{2}$ до v ?

Решение. Будем считать, что за счет работы, совершаемой двигателем, увеличивается кинетическая энергия автомобиля: $A = \Delta E_k$.

Следовательно, на первом участке разгона двигатель совершает работу A_1 , равную $A_1 = \Delta E_{k1} = \frac{m(v/2)^2}{2} - 0 = \frac{mv^2}{8}$. На втором участке работа A_2 равна:

$$A_2 = \frac{mv^2}{2} - m \frac{(v/2)^2}{2} = \frac{3mv^2}{8}.$$

Отношение работ на указанных участках разгона равно: $A_1 : A_2 = 1 : 3$, т. е. чем больше скорость, тем большую мощность должен развивать двигатель, чтобы поддерживать ускорение движения постоянным.

Задача 3. Рассчитайте вторую космическую скорость. Сравните ее с первой космической скоростью.

Решение. Вторая космическая скорость — это скорость, необходимая кораблю для того, чтобы удалиться от Земли на бесконечно большое расстояние, т. е. покинуть поле тяготения Земли. Эту же скорость приобретает у Земли космический корабль, который на

бесконечно большом расстоянии покоился, а затем стал падать на Землю под действием силы тяготения. В этом случае работа силы тяготения является мерой увеличения кинетической энергии корабля и одновременно мерой уменьшения его потенциальной энергии: $A = \Delta E_k = -\Delta E_p$.

Выразим ΔE_k и ΔE_p :

$$\Delta E_k = \frac{mv_{II}^2}{2} - 0 = \frac{mv_{II}^2}{2}, \quad \Delta E_p = -G \frac{mM}{R} - 0 = -G \frac{mM}{R}.$$

Так как $\Delta E_k = -\Delta E_p$, то $\frac{mv_{II}^2}{2} = G \frac{mM}{R}$, откуда $v_{II} = \sqrt{\frac{2GM}{R}} = \sqrt{\frac{2GM}{R^2}} R = \sqrt{2gR}$.

Подставляя числовые значения, получим $v_{II} = 1,12 \cdot 10^4$ м/с.

Первая космическая скорость определяется уравнением $v_I = \sqrt{\frac{GM}{R}} = \sqrt{gR}$.

Сравнивая эти выражения, получим $v_{II} = v_I \sqrt{2}$.

Задача 4. Рассчитайте третью космическую скорость, т. е. минимальную скорость, которую надо сообщить космическому кораблю, стартующему с Земли, чтобы он смог покинуть пределы Солнечной системы.

Решение. Для того чтобы покинуть пределы Солнечной системы, космический корабль массой m должен обладать скоростью v_c относительно Солнца, определяемой законом сохранения энергии:

$$\frac{mv_c^2}{2} - G \frac{mM_c}{R_c} = 0,$$

где $M_c = 2 \cdot 10^{30}$ кг — масса Солнца; $R_c = 1,5 \cdot 10^{11}$ м — радиус земной орбиты. Из этого выражения найдем скорость корабля относительно Солнца: $v_c = \sqrt{\frac{2GM_c}{R_c}} = 4,22 \cdot 10^4$ м/с.

Корабль, вследствие движения вместе с Землей по орбите вокруг Солнца, уже обладает скоростью v_0 , которую можно найти, применив второй закон Ньютона: $\frac{GM_c m}{R_c^2} = \frac{mv_0^2}{R_c}$. Отсюда $v_0 = \sqrt{\frac{GM_c}{R_c}} = 2,98 \cdot 10^4$ м/с.

Следовательно, при разгоне корабля в направлении вектора скорости движения Земли по его орбите вокруг Солнца скорость космического корабля относительно Земли для выхода за пределы Солнечной системы должна быть равна: $v_{к3} = v_c - v_0 = v_0(\sqrt{2} - 1) = 1,24 \cdot 10^4$ м/с.

Для того чтобы удалить корабль из поля тяготения Земли, ему надо сообщить вторую космическую скорость (ее мы рассчитали в предыдущей задаче):

$$v_{II} = \sqrt{\frac{2GM_3}{R_3}},$$

где $M_3 = 6 \cdot 10^{24}$ кг — масса Земли; $R_3 = 6,4 \cdot 10^6$ м — радиус Земли; $v_{II} = 1,12 \cdot 10^4$ м/с.

Следовательно, кинетическая энергия E_k , которую надо сообщить космическому кораблю для того, чтобы он покинул Солнечную систему, складывается из кинетической энергии E_{k1} , необходимой для того, чтобы его удалить из поля тяготения Земли, и кинетической энергии E_{k2} , необходимой для того, чтобы он с орбиты Земли ушел в космическое пространство: $E_k = E_{k1} + E_{k2}$, или $\frac{mv_{II}^2}{2} = \frac{mv_{II}^2}{2} + \frac{mv_{кз}^2}{2}$. Отсюда

$$v_{III} = \sqrt{v_{II}^2 + v_{кз}^2}; \quad v_{III} = \sqrt{1,12^2 \cdot 10^8 + 1,24^2 \cdot 10^8} \text{ м/с} = 1,67 \cdot 10^4 \text{ м/с}.$$

Задача 5. Космический корабль обращается вокруг Луны по круговой орбите, радиус которой равен трем радиусам Луны ($R = 3R_L$). Какую минимальную скорость нужно сообщить спускаемому аппарату, чтобы он прилунился на противоположной стороне Луны?

Решение. Начальную скорость v_0 космического корабля на круговой орбите определим, используя второй закон Ньютона:

$$G \frac{M_L m}{R^2} = \frac{mv_0^2}{R},$$

где M_L — масса Луны; m — масса космического корабля. Отсюда $v_0 = \sqrt{\frac{GM_L}{R}} = \sqrt{\frac{GM_L}{3R_L}}$.

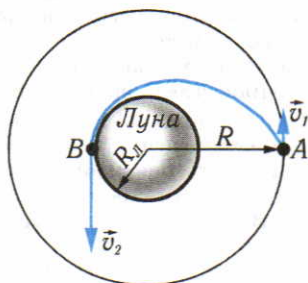


рис. 1.48

Спускаемый аппарат массой m_1 должен двигаться по эллиптической орбите, касающейся поверхности Луны в точке B (рис. 1.48). При движении по этой траектории выполняются законы сохранения энергии и момента импульса:

$$\begin{cases} \frac{m_1 v_1^2}{2} - G \frac{M_L m_1}{R} = \frac{m_1 v_2^2}{2} - G \frac{M_L m_1}{R_L}, & (1) \\ m_1 v_1 R \sin \varphi_A = m_1 v_2 R_L \sin \varphi_B; & (2) \end{cases}$$

так как $\varphi_A = 90^\circ$, $\varphi_B = 90^\circ$, то $v_1 R = v_2 R_L$.

Решая полученную систему уравнений и учитывая, что $R = 3R_L$, получим

$$v_2^2 - v_1^2 = 2GM_L \left(\frac{1}{R_L} - \frac{1}{3R_L} \right), \quad v_1 \cdot 3R_L = v_2 R_L, \quad 8v_1^2 = 2GM_L \frac{2}{3R_L},$$

$$\begin{cases} v_1 = \sqrt{GM_L / 6R_L}, \\ v_2 = 3v_1. \end{cases}$$

Из сравнения выражений для v_0 и v_1 видно, что $v_1 < v_0$. Следовательно

но, спускаемому аппарату нужно сообщить скорость в направлении, противоположном вектору скорости $\vec{v}_0$. Модуль скорости равен:

$$v = v_0 - v_1 = \sqrt{\frac{GM_{\text{Л}}}{3R_{\text{Л}}}} - \sqrt{\frac{GM_{\text{Л}}}{6R_{\text{Л}}}} = \sqrt{\frac{GM_{\text{Л}}}{R_{\text{Л}}}} \left(\frac{1}{\sqrt{3}} - \frac{1}{\sqrt{6}} \right) = \sqrt{\frac{GM_{\text{Л}}}{R_{\text{Л}}}} (0,577 - 0,408) = 0,169 \sqrt{\frac{GM_{\text{Л}}}{R_{\text{Л}}}}.$$

Масса и радиус Луны известны (значения берем из справочника): $R_{\text{Л}} = 1737$ км, $M_{\text{Л}} = 7,35 \cdot 10^{22}$ кг. Тогда $v = 284$ м/с.

Задачи для самостоятельного решения

10.1. В самолет, летящий со скоростью v , попадает пуля, двигавшаяся ему навстречу с такой же по модулю скоростью. В результате неупругого удара пуля застряла в самолете и стала двигаться вместе с ним практически с той же скоростью. Кинетическая энергия пули в результате удара как будто бы не изменилась. За счет какой же энергии произведена работа по разрушению материала обшивки самолета и произошло нагревание пули при ударе? Чему равна потеря кинетической энергии пули?

10.2. Тело скользит по наклонной плоскости с высоты $h = 0,1$ м. После этого оно продолжает двигаться по горизонтали и останавливается. Горизонтальное смещение тела от исходной точки равно $l = 0,5$ м. Определите коэффициент трения, считая его одинаковым на наклонном и горизонтальном участках пути. Наклонная плоскость плавно переходит в горизонтальную.

10.3. Г. Гюйгенс утверждал, что если шар на невесомой и нерастяжимой нити вращается в вертикальной плоскости, то нить должна выдержать силу, равную по крайней мере удвоенной силе тяжести, действующей на шар. Докажите это утверждение.

10.4. Пуля массой 5 г попадает в ящик с песком массой 1 кг, подвешенный на тросе. Максимальное отклонение ящика от положения равновесия таково, что его центр тяжести поднялся на высоту 0,2 м от первоначального уровня. Определите скорость пули.

10.5. Под каким углом могут разлететься два тела одинаковой массы после упругого нецентрального столкновения? (Упругим называется столкновение, при котором кинетическая энергия поступательного движения тел сохраняется; нецентральный — столкновение, при котором направление относительной скорости первого тела не проходит через центр масс второго тела.)

10.6. Пуля вылетает из пневматической винтовки со скоростью 50 м/с и, попав в неподвижный брусок, лежащий на горизонтальной поверхности стола, застревает в нем. На какое расстояние передвинется брусок, если его масса в 49 раз больше массы пули, а коэффициент трения между бруском и поверхностью стола равен 0,1?

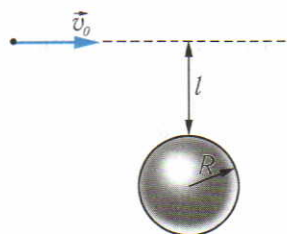


рис. 1.49

10.7. Метеорит, скорость которого на большом расстоянии от Луны равна $v_0 = 2360$ м/с, летит по направлению к Луне, радиус которой $R = 1,74 \cdot 10^6$ м. Определите минимальное прицельное расстояние l , при котором метеорит не упадет на поверхность Луны (рис. 1.49). Ускорение свободного падения на Луне $g_{\text{Л}} = 1,6$ м/с².

В природе и технике часто встречаются движения тел с переменными ускорениями. Такие движения возникают под действием изменяющихся со временем сил. Примером движения тел с переменными ускорениями являются механические колебания. *Механическими колебаниями* называют движения тел, повторяющиеся точно или приблизительно через одинаковые промежутки времени.

Колебания тел происходят только в результате их взаимодействия с другими телами. Тела, взаимодействие между которыми приводит к возникновению колебаний, составляют *колебательную систему*. Силы, действующие внутри колебательной системы, называют внутренними силами. Колебания, происходящие под действием внутренних сил в колебательной системе, называют *свободными колебаниями*.

Колебания маятника являются примером свободных механических колебаний. Однажды выведенный из положения равновесия маятник длительное время совершает колебания без внешних воздействий.

Условия возникновения свободных механических колебаний. Свободные механические колебания возникают при выполнении следующих условий.

1. В одном определенном положении тела в пространстве, называемом положением равновесия, равнодействующая сил, приложенных к телу, должна быть равна нулю. При выведении тела из положения равновесия равнодействующая всех сил должна быть отлична от нуля и направлена к положению равновесия.

2. Для начала свободных колебаний система должна быть выведена из положения равновесия внешним воздействием.

3. Силы трения в системе малы по сравнению с силами, зависящими от координат.

При любом механическом движении тел в результате действия сил трения происходит превращение части механической энергии во внутреннюю энергию теплового движения атомов и молекул, отклонения тела от положения равновесия постепенно уменьшаются и через некоторое время колебания прекращаются. Уменьшение отклонений тела от положения равновесия с течением времени называется затуханием колебаний. Свободные механические колебания всегда оказываются затухающими колебаниями.

Период, частота и амплитуда колебаний. Минимальный интервал времени, через который тело оказывается в той же точке пространства и движется с той же скоростью и с тем же ускорением, называется *периодом колебания*. Период колебания измеряется в секундах, обозначается латинской бук-

вой T . Физическая величина, равная числу колебаний, совершаемых за одну секунду, называется *частотой колебаний*. Частота обозначается греческой буквой ν (ню). Если тело совершило n колебаний за t секунд, то частота колебаний равна:

$$\nu = \frac{n}{t}, \quad (11.1)$$

а период колебания T равен:

$$T = \frac{t}{n}. \quad (11.2)$$

Единица частоты в СИ называется герц (Гц): $1 \text{ Гц} = 1 \text{ с}^{-1}$. При частоте 1 герц совершается одно колебание за одну секунду.

Период и частота колебаний связаны соотношением

$$T = \frac{1}{\nu}. \quad (11.3)$$

Одной из основных характеристик колебаний, кроме их периода и частоты, является *амплитуда колебаний*. Амплитудой механических колебаний тела называется наибольшее значение смещения тела от положения равновесия.

Гармонические колебания. Если координата x тела, совершающего колебания вдоль оси OX , изменяется со временем t по закону синуса или косинуса:

$$x = x_0 \sin 2\pi \nu t \text{ или } x = x_0 \cos 2\pi \nu t, \quad (11.4)$$

то такие колебания называются гармоническими колебаниями. В уравнениях (11.4) x_0 — амплитуда колебаний; ν — частота колебаний. Вместо частоты ν в уравнении гармонических колебаний может быть использована циклическая частота ω :

$$\omega = 2\pi \nu, \quad x = x_0 \cos \omega t \quad (11.5)$$

или период колебания T :

$$x = x_0 \cos \frac{2\pi}{T} t. \quad (11.6)$$

Величина, стоящая под знаком косинуса или синуса, называется *фазой φ гармонического колебания*:

$$\varphi = 2\pi \nu t = \omega t = \frac{2\pi}{T} t. \quad (11.7)$$

Маятник. Рассмотрим колебания тела, подвешенного на нити, — маятника. Когда тело неподвижно и находится на одной вертикальной прямой с точкой подвеса, сила упругости $\vec{F}_{\text{упр}}$ и сила тяжести $m\vec{g}$ равны по модулю и направлены противоположно, их равнодействующая $\vec{F}$ равна нулю. Это положение тела является положением равновесия. При отклонении тела от положения равновесия вправо или влево равнодействующая сил тяжести и упругости не равна нулю

и направлена к положению равновесия (рис. 1.50). Если груз отклонить и отпустить, то он начинает двигаться с ускорением к положению равновесия, так как равнодействующая сила отлична от нуля. По мере приближения к положению равновесия угол между векторами силы тяжести и силы упругости увеличивается, равнодействующая сил изменяется по модулю и направлению, но остается направленной к положению равновесия. После прохождения положения равновесия угол между векторами силы тяжести и силы упругости уменьшается, вектор равнодействующей силы изменяется и вновь направлен

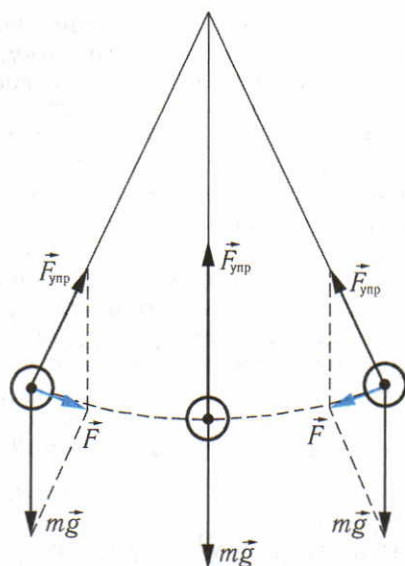


рис. 1.50

к положению равновесия. Под действием этой силы скорость движения тела постепенно уменьшается и становится равной нулю при максимальном отклонении от положения равновесия. Затем направление движения вновь изменяется, тело движется к положению равновесия и т. д., процесс повторяется. Для упрощения теоретического рассмотрения задачи о колебании маятника применяется идеализированная модель: тело массой m столь малых размеров, что его можно считать материальной точкой, подвешено на невесомой и нерастяжимой нити длиной l . Силы трения в подвесе и сопротивление воздуха отсутствуют. Такую идеализированную модель называют *математическим маятником*.

При малых углах отклонения от положения равновесия колебания математического маятника являются приблизительно гармоническими. Период колебания математического маятника определяется формулой математического маятника:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}, \quad (11.8)$$

где l — длина подвеса маятника; g — ускорение свободного падения.

Формулу математического маятника можно использовать для вычисления периода колебания тела на подвесе, если размеры тела малы по сравнению с длиной подвеса и масса подвеса пренебрежимо мала по сравнению с массой тела. Зависимость периода колебания маятника от ускорения силы тяжести используется на практике для точных измерений у-

корения силы тяжести в различных местах на поверхности Земли. По результатам измерений ускорения силы тяжести можно обнаружить район залегания полезных ископаемых. В тех местах, где находятся полезные ископаемые с плотностью более высокой, чем средняя плотность земной коры (например, залежи железной руды), ускорение силы тяжести имеет повышенное значение. Скопления нефти и газа под землей связаны с пористыми породами пониженной плотности, поэтому над нефтяными и газовыми месторождениями ускорение силы тяжести имеет пониженные значения.

Превращения энергии при свободных колебаниях. При свободных колебаниях маятника по мере отклонения от положения равновесия увеличивается его потенциальная энергия и уменьшается кинетическая энергия, однако сумма потенциальной и кинетической энергий по закону сохранения энергии остается постоянной в любой момент времени:

$$\frac{mv^2}{2} + mgh = \text{const}, \quad (11.9)$$

где v — скорость маятника в произвольный момент времени; h — его высота относительно положения равновесия в тот же момент времени.

Другой пример свободных механических колебаний — колебания груза, подвешенного на пружине. Если один конец спиральной пружины жесткостью k закрепить на вертикально установленном штативе, а к другому концу подвесить груз массой m , то груз может находиться в состоянии покоя при условии равенства суммы проекций сил тяжести и упругости на ось OX , направленную вертикально вниз:

$$mg + F_{\text{упр}x} = 0.$$

Сила упругости $F_{\text{упр}x}$ по закону Гука равна:

$$F_{\text{упр}x} = -kx,$$

поэтому в положении равновесия (рис. 1.51) деформация пружины x_0 удовлетворяет условию:

$$mg - kx_0 = 0. \quad (11.10)$$

При смещении груза вниз от положения равновесия на расстояние x сила упругости равна:

$$F_{\text{упр}} = -k(x_0 + x) = -kx_0 - kx,$$

а равнодействующая F силы тяжести и силы упругости равна:

$$F = F_{\text{упр}} + mg, \quad F = -kx_0 - kx + mg = -kx.$$

Знак «минус» в последнем уравнении по-

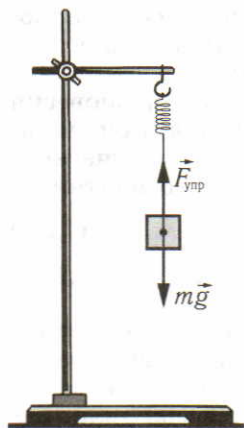


рис. 1.51

казывает, что равнодействующая направлена противоположно смещению x , т. е. вверх (рис. 1.52). Под действием равнодействующей груз движется вверх с ускорением a :

$$a = \frac{F}{m} = -\frac{k}{m} x. \quad (11.11)$$

При достижении положения равновесия ($x=0$) ускорение груза становится равным нулю, но по инерции груз продолжает движение вверх до тех пор, пока весь запас кинетической энергии тела, приобретенной в процессе ускоренного движения к положению равновесия, не превратится в потенциальную энергию. После достижения верхней точки подъема груз начинает ускоренное движение вниз, так как выше положения равновесия равнодействующая F силы тяжести и силы упругости направлена вниз и вновь равна:

$$F = -kx.$$

Так как с изменением смещения x груза от положения равновесия равнодействующая F изменяется по модулю и направлению, колебательное движение груза на пружине не является равноускоренным движением. Закон движения груза на пружине можно найти, решив уравнение (11.11).

Ускорение прямолинейного движения тела вдоль координатной оси является первой производной проекции скорости тела на эту ось или второй производной координаты:

$$a_x = v'_x = (x')' = x''. \quad (11.12)$$

Поэтому из уравнений (11.11) и (11.12) следует:

$$x'' = -\frac{k}{m} x. \quad (11.13)$$

Введя обозначение $\omega^2 = \frac{k}{m}$, из формулы (11.13) получим

$$x'' = -\omega^2 x. \quad (11.14)$$

Решением уравнения (11.14) является функция

$$x = x_0 \cos \omega t \text{ или } x = x_0 \sin \omega t. \quad (11.15)$$

Это утверждение легко проверить для первого решения, выполнив дважды операцию дифференцирования:

$$x' = -x_0 \omega \sin \omega t, \quad x'' = -x_0 \omega^2 \cos \omega t = -\omega^2 x.$$

Полученное в качестве решения уравнение (11.15) движения груза на пружине показывает, что координата x груза пери-

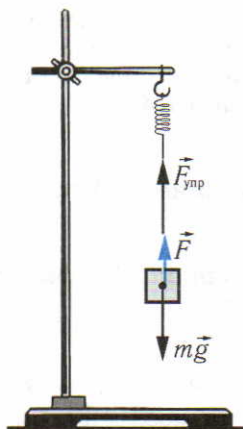


рис. 1.52

одически изменяется со временем по закону косинуса или синуса. Следовательно, колебания груза на пружине являются гармоническими колебаниями с амплитудой x_0 , циклической частотой ω

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (11.16)$$

и линейной частотой

$$\nu = \frac{\omega}{2\pi}. \quad (11.17)$$

Период T гармонического колебания груза на пружине равен:

$$T = \frac{1}{\nu} = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}. \quad (11.18)$$

Если на тело действует только сила упругости или действия всех сил, кроме силы упругости, скомпенсированы, то тело совершает гармонические колебания, период и частота этих колебаний определяются формулами (11.16)—(11.18).

При гармонических колебаниях под действием силы упругости в любой момент времени сумма кинетической энергии E_k и потенциальной энергии E_p упругой деформации пружины остается постоянной:

$$E_k + E_p = \frac{mv^2}{2} + \frac{kx^2}{2} = \text{const}. \quad (11.19)$$

Резонанс. Если колебания совершаются под действием периодически действующих внешних сил, то такие колебания называются *вынужденными колебаниями*. При возбуждении вынужденных колебаний энергия тела изменяется за счет действия внешних сил. Особого рассмотрения заслуживает случай действия переменной силы на систему, способную совершать свободные механические колебания. Опыт показывает, что при плавном увеличении частоты воздействия внешней силы амплитуда вынужденных колебаний тела сначала увеличивается, затем, после достижения некоторого максимального значения, постепенно убывает. Максимального значения амплитуда вынужденных колебаний достигает при частоте ν колебаний силы, примерно равной собственной частоте ν_0 колебаний системы. Явление возрастания амплитуды установившихся вынужденных колебаний до максимального значения при приближении частоты изменения внешней силы к частоте свободных колебаний системы называется *резонансом*. При совпадении частоты ν изменения силы с собственной частотой ν_0 колебаний системы внешняя сила в течение всего периода направлена в ту же сторону, что и вектор скорости колеблющегося тела. Поэтому в течение всего периода внешняя сила совершает положительную работу, увеличивая амплитуду колебаний тела. Так как при резонансе внешняя сила совершает за период максимальную положительную работу над колебательной системой, условие

резонанса можно определить как условие максимальной передачи энергии колебательной системе.

■ Вопросы

1. При каких условиях возникают свободные механические колебания? 2. Какие колебания называются гармоническими колебаниями? 3. От каких параметров зависит период колебания маятника? 4. Что такое резонанс?

■ ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Задача. Рассчитайте период малых колебаний математического маятника.

Решение. При отклонении маятника от положения равновесия момент M силы тяжести относительно точки подвеса равен:

$$M = mgd = mgl \sin \alpha.$$

Под действием этого момента сил маятник движется с угловым ускорением ε , определяемым уравнением динамики вращательного движения: $M = I\varepsilon$, где I — момент инерции маятника, равный ml^2 . Так как $\varepsilon = \alpha''$, получаем $-mgl \sin \alpha = ml^2 \alpha''$, $-g \sin \alpha = l \alpha''$.

Знак «минус» показывает, что возвращающий момент сил направлен в сторону, противоположную отклонению маятника от положения равновесия. Так как по условию задачи амплитуда колебаний мала, то можно записать: $\sin \alpha \approx \alpha$, $-g\alpha = l\alpha''$, $\alpha'' = -\alpha g/l$. Введя обозначение $g/l = \omega^2$, получаем дифференциальное уравнение гармонических колебаний с периодом T , равным:

$$T = 2\pi/\omega = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}.$$

Решением полученного уравнения является функция $\alpha = \alpha_m \sin \omega t$ или $\alpha = \alpha_m \cos \omega t$. Вид этой функции определяется выбором момента начала отсчета времени. Если мы отклоним маятник от положения равновесия, отпустим и одновременно начнем отсчет времени, то решением уравнения является функция $\alpha = \alpha_m \cos \omega t$, так как при $t=0$ $\alpha = \alpha_m$. Если же мы начнем отсчет времени в момент прохождения положения равновесия, то решением уравнения является функция $\alpha = \alpha_m \sin \omega t$, так как при $t=0$ $\alpha=0$.

При малых значениях угла α отклонение x маятника от положения равновесия примерно равно длине дуги окружности радиусом l с центральным углом α : $x \approx l\alpha_m \sin \omega t$. Обозначив $l\alpha_m = x_m$, получаем $x \approx x_m \sin \omega t$, $v = x' = x_m \omega \cos \omega t$, т. е. координата x смещения маятника от положения равновесия и скорость v изменяются также по гармоническому закону.

■ Задачи для самостоятельного решения

11.1. Груз массой m подвешен на двух пружинах жесткостью k_1 и k_2 . Чему равны периоды малых колебаний груза в случаях:

- пружины соединены параллельно;
- пружины соединены последовательно?

11.2. Два шара массами m_1 и m_2 соединены пружиной жесткостью k . Чему равен период малых колебаний грузов относительно центра масс этой системы?

11.3. Рассчитайте периоды колебаний математического маятника длиной l , подвешенного в лифте, в следующих случаях:

- а) лифт движется равномерно;
- б) лифт поднимается с ускорением a , направленным вертикально вверх;
- в) лифт опускается с ускорением a , направленным вертикально вниз.

11.4. Рассчитайте период колебания математического маятника длиной l , подвешенного в вагоне, при движении вагона в горизонтальном направлении с ускорением a .

11.5. Рассчитайте периоды колебаний груза массой m , подвешенного на пружине жесткостью k , для случаев, описанных в задачах 11.3 и 11.4.

§ 12 Механические волны

В непрерывной упругой среде, состоящей из взаимодействующих между собой частиц, колебания частиц в одном месте вызывают вынужденные колебания соседних частиц, те, в свою очередь, возбуждают колебания следующих за ними частиц и т. д. Процесс распространения механических колебаний в твердых, жидких и газообразных телах называется *механической волной*. Волны, в которых колебания происходят перпендикулярно направлению распространения волны, называются *поперечными волнами*. Волны, в которых колебания происходят вдоль направления распространения волны, называются *продольными волнами*.

Примером продольных волн являются звуковые волны. Например, колебания струны гитары сопровождаются периодическими сжатиями и разрежениями воздуха вблизи нее.

Эти процессы сжатия и разрежения распространяются в воздухе во все стороны. Они и являются звуковыми волнами. Ощущение звука в наших органах слуха возникает при периодических изменениях давления воздуха. Звуковые волны с большой амплитудой изменения звукового давления воспринимаются человеческим ухом как громкие звуки, с малой амплитудой изменения звукового давления — как тихие.

Звуковые колебания высокой частоты называются звуками высокого тона, звуковые колебания низкой частоты называются звуками низкого тона. Органы слуха человека способны воспринимать звуки с частотой в пределах примерно от 20 до 20 000 Гц. Продольные механические волны с частотой менее 20 Гц называют *инфразвуком*, с частотой более 20 000 Гц — *ультразвуком*.

Звуковые волны, встречаясь с любым телом, вызывают его вынужденные колебания. Если частота собственных свободных колебаний тела совпадает с частотой звуковой вол-

ны, то условия для передачи энергии от звуковой волны телу оказываются наилучшими, амплитуда вынужденных колебаний при этом достигает максимального значения — наблюдается акустический резонанс. Акустическими резонаторами являются корпус гитары, корпус скрипки, трубы духовых инструментов.

Уравнение волны. Если тело колеблется вдоль оси OX по гармоническому закону с частотой ν , то изменение давления воздуха вблизи колеблющегося тела происходит также по гармоническому закону:

$$p = p_0 \cos 2\pi \nu t. \quad (12.1)$$

Волны сжатия и разрежения, возникающие около колеблющегося тела, достигают точки, удаленной на расстояние x , спустя время $\Delta t = \frac{x}{v}$, где v — скорость распространения изменения давления воздуха. Следовательно, в этой точке колебания происходят по тому же закону [см. формулу (12.1)], что и вблизи источника звука, но с запаздыванием по времени на величину Δt :

$$p = p_0 \cos 2\pi \nu (t - \Delta t) = p_0 \cos \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{x}{v} \right). \quad (12.2)$$

Уравнение (12.2) называется *уравнением волны*. Оно применимо для описания звуковых колебаний при условии, если звуковую волну можно считать плоской, т. е. принять, что колебания распространяются только в направлении оси OX и амплитуда их не убывает с увеличением расстояния от источника звука. В этом случае обнаруживается двойная периодичность волнового процесса — временная и пространственная.

Действительно, согласно уравнению (12.2) колебания давления в любой фиксированной точке пространства ($x = \text{const}$) происходят по гармоническому закону с частотой ν , обнаруживая временную периодичность. В разных же точках пространства колебания в один и тот же момент времени ($t = \text{const}$) различаются значениями фазы φ колебаний:

$$\varphi = - \frac{2\pi x}{Tv}.$$

Зависимость давления от координаты x , выражаемая уравнением (12.2), также является гармонической.

Длина волны. При распространении гармонических колебаний изменение давления с течением времени в какой-нибудь одной точке пространства повторяется через определенный промежуток времени T — период колебания. Но при этом, как уже было сказано, наблюдается и пространственная периодичность и можно указать расстояние λ вдоль направления распространения волны, на котором происходит

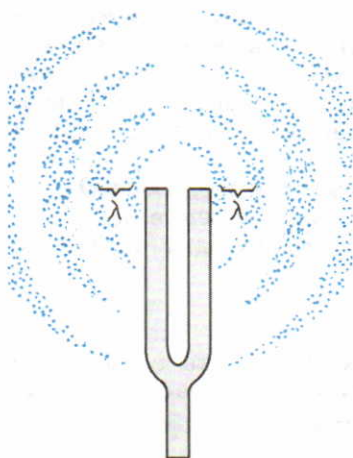


рис. 1.53

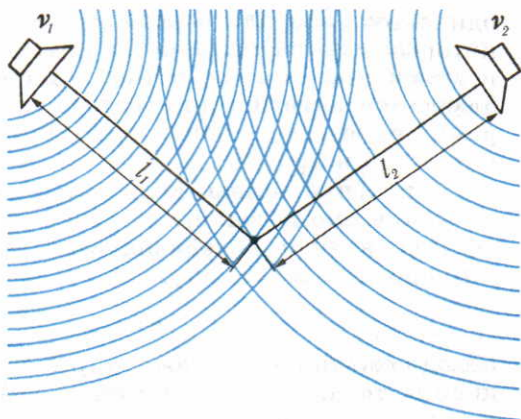


рис. 1.54

полный цикл изменения давления (для данного момента времени t):

$$p_0 \cos \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{x}{v} \right) = p_0 \cos \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{x+\lambda}{v} \right).$$

Из этого уравнения получаем

$$\frac{2\pi\lambda}{Tv} = 2\pi, \quad \lambda = vT. \quad (12.3)$$

Расстояние λ называется *длиной волны* (рис. 1.53).

Из выражения (12.3) следует, что длину волны λ можно определить как расстояние, на которое распространяются колебания за один период.

Суперпозиция волн. Опыт показывает, что механические волны обладают замечательным свойством: они проходят через одно и то же место, не оказывая никакого влияния друг на друга. Это свойство волн определяют как подчинение их *принципу суперпозиции*. В местах наложения волн, приходящих от различных источников, смещение частиц в любой момент времени t равно геометрической сумме смещений, вызываемых в данной точке всеми пришедшими волнами. При наложении звуковых волн в точке A , находящейся на расстояниях l_1 и l_2 от двух источников с частотами ν_1 и ν_2 (рис. 1.54), звуковые колебания в этой точке будут происходить по закону:

$$p = p_1 \cos 2\pi\nu_1 \left(t - \frac{l_1}{v} \right) + p_2 \cos 2\pi\nu_2 \left(t - \frac{l_2}{v} \right).$$

Интерференция волн. При совпадении частот и постоянной разности фаз наблюдается явление *интерференции волн*.

В результате интерференции волн от двух источников колебаний с одинаковой частотой амплитуда результирующих колебаний в различных точках пространства оказывается не-

одинаковой. Она максимальна в тех точках, разность хода до которых от этих источников кратна целому числу длин волн, и минимальна в тех точках, разность хода до которых составляет нечетное число половин длины волны.

Возникновение интерференционных максимумов и минимумов в пространстве не противоречит закону сохранения энергии. При интерференции волн происходит лишь перераспределение энергии колебаний в пространстве.

Используя два источника звука с одинаковой частотой колебаний ν , можно определить скорость v распространения звука в воздухе путем измерения расстояния между двумя соседними интерференционными минимумами. Для этого необходимо присоединить два динамика к выходу одного звукового генератора и перемещать приемное устройство вдоль прямой между динамиками. Два соседних интерференционных минимума находятся на расстоянии $\lambda/2$ друг от друга. Определив расстояние между соседними интерференционными минимумами экспериментальным путем и зная частоту колебаний ν , можно вычислить скорость звука, используя выражение (12.3):

$$\lambda = vT = \frac{v}{\nu}, \quad v = \lambda\nu.$$

При возникновении волн их частота определяется частотой колебаний источника колебаний, а скорость распространения зависит от свойств среды. Поэтому при распространении колебаний с одной и той же частотой длина волны в разных средах оказывается различной.

Сейсмические волны. В упругой земной коре возможно распространение как продольных, так и поперечных волн. Сейсмическими волнами называют волны в земной коре, воз-

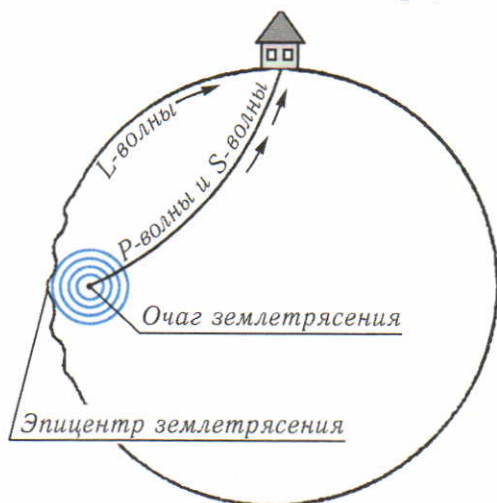


рис. 1.55

никающие при землетрясениях. Продольные сейсмические волны — волны сжатия и разрежения земной коры — называют *P*-волнами. Скорость их распространения примерно 8 км/с. Поперечные сейсмические волны называют *S*-волнами. Их скорость равна примерно 5 км/с.

Кроме *P*- и *S*-волн, распространяющихся внутри Земли, толчок землетрясения вызывает появление *L*-волн, разбегающихся во все стороны от эпицентра землетрясения по поверхности Земли (рис. 1.55). Из-за различия скоростей распространения продольных и поперечных сейсмических волн они регистрируются сейсмографом в разное время. По времени запаздывания поперечных волн относительно момента первой регистрации продольных сейсмических волн и известным значениям скоростей этих волн определяется расстояние до места землетрясения.

■ Вопросы

1. В чем заключается физический смысл уравнения волны? 2. Чем отличаются поперечные волны от продольных? 3. Поясните, что означает принцип суперпозиции волн. 4. При каких условиях наблюдается явление интерференции волн?



МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА



ГЛАВА 2

ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНО- КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

§ 13

Основные положения молекулярно- кинетической теории

Атомы и молекулы. Предположение о том, что любое вещество состоит из мельчайших неделимых частиц — атомов, было высказано около 2500 лет назад древнегреческими философами Левкиппом и Демокритом. По их представлениям, все тела возникают в результате соединения атомов. Различия в свойствах тел объясняются тем, что тела состоят из различных атомов или одинаковые атомы по-разному соединяются между собой в пространстве.

Вот примеры некоторых высказываний Демокрита об атомах:

«Ничего не существует, кроме атомов и пустого пространства; все прочее — мнение»; «Атомы бесконечны в числе и бесконечно различны по форме...»; «Различие всех предметов зависит от различия их атомов в числе, величине, форме и порядке; качественного различия атомов не существует».

Философы Древней Греции рассматривали лишь качественную картину природных явлений, но не исследовали точные количественные закономерности. Поэтому их высказывания о природе вещей не были научной теорией.

Атомистическая гипотеза широкого распространения долгое время не получала. Такие ученые, как Г. Галилей, Р. Декарт, И. Ньютон, М. В. Ломоносов, считали, что материя состоит из мельчайших неделимых частиц, и называли эти частицы корпускулами или атомами. Однако в их работах не было строгого доказательства существования атомов.

Количественное обоснование атомистической теории было дано Джоном Дальтоном (Англия), Жозефом Луи Гей-Люссаком (Франция) и Амедео Авогадро (Италия).

В 1803 г. Д. Дальтон, исследуя условия образования из углерода, кислорода и водорода таких соединений, как метан, этилен, углекислый газ и др., открыл закон *кратных отношений*, в котором утверждается следующее: если простое вещество *A* соединяется с простым веществом *B*, образуя новые вещества *C*, *D*, ..., то при постоянной массе вещества *A* отношение масс вещества *B* в различных продуктах реакции составляет малые целые числа.

В 1808 г. Гей-Люссак экспериментально установил закон кратных отношений для химически взаимодействующих газов. *Объемы газов, вступающих в химическое соединение, при одинаковых значениях давления и температуры относятся как целые числа*, например 1:2, 1:3 или 2:3. Из этого закона следовало, что в равных объемах любых газов при одинаковых условиях находится одинаковое число частиц. Однако некоторые опытные результаты закон объяснить не мог. Например, при соединении одного объема хлора с одним объемом водорода образуется не один объем хлорида водорода, а два объема. Это противоречие было разрешено в 1811 г. А. Авогадро формулировкой двух принципов:

- 1) все вещества, простые и сложные, образованы из молекул («составных молекул»), которые сами состоят из атомов («элементарных молекул»);
- 2) в равных объемах любых газов при одинаковых условиях содержится одно и то же число молекул.

Последнее утверждение и называют собственно *законом Авогадро*.

Измерение масс атомов и молекул. Используя атомистическую теорию строения вещества, Д. Дальтон разработал простой способ определения относительных масс атомов. Он предложил за единицу массы атомов принять массу одного атома водорода. Массу атома любого другого элемента можно найти, сравнив массу водорода с массой вещества, вступившего в химическую реакцию соединения этого элемента с водородом.

В настоящее время за единицу массы атомов и молекул принимается $1/12$ массы атома изотопа углерода ^{12}C (с массовым числом 12). Она называется атомной единицей массы (а. е. м.):

$$1 \text{ а. е. м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

Относительная масса атомов и молекул показывает, во сколько раз масса атома или молекулы данного вещества больше $1/12$ массы атома углерода ^{12}C .

Количество вещества. Мы пришли к выводу, что вещество имеет *дискретную структуру*: оно состоит из мельчайших частиц, называемых *структурными элементами*. Ими могут быть атомы, молекулы или ионы. В процессе взаимодействия этих частиц часто происходят химические реакции, причем между числом частиц разных веществ, участвующих в реакции, существуют определенные отношения.

Принято называть *количеством вещества* физическую величину ν , пропорциональную числу частиц — структурных элементов данной системы. Единица количества вещества называется моль (моль). 1 моль равен количеству вещества системы, содержащей столько же структурных элементов (т. е. столько частиц), сколько атомов содержится в 0,012 кг углерода ^{12}C . Отношение числа N атомов или молекул вещества к количеству вещества ν является постоянной величиной. Эта величина называется *постоянной Авогадро* N_A :

$$N_A = \frac{N}{\nu}. \quad (13.1)$$

Количество вещества однородной системы равно отношению числа структурных элементов в веществе N к постоянной Авогадро N_A :

$$\nu = \frac{N}{N_A}. \quad (13.2)$$

Молярная масса. *Молярной массой* M называется величина, равная отношению массы вещества m к количеству вещества ν :

$$M = \frac{m}{\nu}. \quad (13.3)$$

Молярная масса выражается в килограммах на моль (кг/моль).

Масса молекулы (атома). Для определения массы m_0 молекулы (или атома) нужно разделить массу m вещества на число N молекул (атомов) в нем:

$$m_0 = \frac{m}{N} = \frac{m}{\nu N_A} = \frac{M}{N_A}. \quad (13.4)$$

Таким образом, чтобы найти массу молекулы вещества, нужно знать молярную массу вещества M и постоянную Авогадро N_A . Молярную массу вещества обычно определяют химическими методами, постоянная Авогадро с высокой степенью точности определена несколькими физическими методами.

Размеры атомов и молекул. Оценить размеры атомов и молекул можно следующим образом. Согласно представлени-

ям молекулярно-кинетической теории атомы и молекулы вещества в твердом или жидком состоянии расположены практически вплотную друг к другу. Поэтому объем V_0 , занимаемый одной молекулой (или атомом), можно найти, разделив объем V вещества в твердом или жидком состоянии на число N атомов или молекул в нем:

$$V_0 = \frac{V}{N} = \frac{m}{\rho v N_A} = \frac{vM}{\rho v N_A} = \frac{M}{\rho N_A}. \quad (13.5)$$

Диаметр молекулы вещества можно оценить путем определения минимальной толщины слоя жидкости. Такие оценки делаются в опытах по измерению площади S поверхности растекающейся жидкости известного объема V (пленки масла, кислоты).

Размеры отдельных молекул и их массы в настоящее время измеряются с большой точностью. С помощью электронных и ионных микроскопов выяснен характер упаковки молекул и атомов в кристаллах. Таким образом, точные измерения с использованием современных приборов подтвердили основные положения молекулярно-кинетической теории о дискретной структуре вещества.

Природа теплоты. Важным этапом в развитии и утверждении атомно-молекулярной теории строения вещества была разработка кинетической теории теплоты.

С XVII в. существовали две гипотезы о природе теплоты. Согласно первой теплота представляет собой особый вид материи — теплород. Содержание теплорода в теле определяет его температуру, процессы теплообмена обусловлены переходами теплорода из одного тела в другое. На основе представлений о теплороде сформировались такие понятия, как «количество теплоты», «теплоемкость тела» и др.

Вторая гипотеза о природе теплоты — корпускулярная — объясняла все тепловые явления движением частиц, из которых состоят тела. Такие взгляды на природу теплоты высказывали английский философ Ф. Бекон, французский ученый Р. Декарт. Значительный вклад в развитие и обоснование корпускулярной гипотезы о природе теплоты внес М. В. Ломоносов. В 1745 г. он дал объяснение явлений теплопроводности, плавления, испарения на основе представлений о вращательном движении частиц, из которых состоят тела.

Им был сделан вывод о существовании самой низкой температуры тела, соответствующей абсолютному покою составляющих его частиц. Однако в действительности этот вопрос оказался гораздо сложнее.

Важные эксперименты, которые заставили усомниться в существовании теплорода, были выполнены в 1798 г. английским физиком Б. Румфордом. Он исследовал нагревание тел

при трении. Так как согласно теплородной гипотезе теплота не создается и не исчезает, а только переходит от одного тела к другому, повышение температуры трущихся тел объясняли тем, что при трении тел от них отрываются мелкие части, имеющие якобы меньшую удельную теплоемкость, чем само тело, поэтому и выделяется теплота.

Румфорд установил, что при сверлении пушечного ствола тупым сверлом выделяется такое количество теплоты, что никакими изменениями теплоемкости стружек этого нельзя объяснить. В специальном опыте он установил также, что удельная теплоемкость стружек при сверлении в действительности не отличается от удельной теплоемкости целого куска металла. Особенно большое впечатление на современников Румфорда произвел опыт, в котором в ящик с водой был помещен пушечный ствол и через 2,5 ч после начала сверления вода закипела без нагрева огнем. На основании этих опытов Румфорд пришел к выводу о несостоятельности теплородной гипотезы: «Я должен признать, что результаты всех моих экспериментов не приводят ни к какому иному выводу... что теплота не что иное, как колебательное движение частиц тела».

Тепловое движение частиц вещества. Ряд явлений природы свидетельствует о беспорядочном движении частиц вещества. Прежде всего, это *диффузия*, которая заключается в том, что при контакте двух тел наблюдается взаимное проникновение одного вещества в другое. Так, капля чернил (или марганцовки) очень быстро расплывается в стакане с водой, и самопроизвольно образуется вполне однородный раствор. Легко растворяются в воде многие соли, например поваренная соль, медный купорос, перманганат калия и т. п. Хорошо диффундируют в воде сахар, спирты, кислоты.

Очень быстро диффундируют газы, образуя однородную смесь независимо от их плотности. Например, плотность кислорода в 1,14 раза, а плотность углекислого газа в 1,57 раза больше плотности азота, но в атмосферном воздухе они образуют однородную смесь.

Труднее всего идет диффузия в твердых телах. Но и здесь опыты показали, что если хорошо очистить поверхность двух металлов (например, меди и серебра), плотно прижать их друг к другу и оставить в таком состоянии длительное время, то в каждом из соприкасающихся слоев обнаруживаются атомы другого металла.

Наиболее наглядным экспериментальным подтверждением представлений молекулярно-кинетической теории о беспорядочном тепловом движении атомов и молекул является *броуновское движение* — движение мелких частиц, взвешенных в жидкости или газе. Броуновское движение обнаружи-

вает большое сходство с диффузионным движением молекул и атомов.

Беспорядочное движение мелких твердых частиц, находящихся в жидкости или газе, впервые в 1827 г. обнаружил при наблюдении в микроскоп английский ботаник Р. Броун.

Это явление смогла объяснить лишь молекулярно-кинетическая теория на основе использования представлений о дискретном строении вещества и беспорядочном тепловом движении молекул (атомов). Молекулы жидкости или газа сталкиваются с твердой частицей и изменяют направление и модуль скорости ее движения. Число молекул, ударяющих частицу с различных сторон, и направление передаваемого ими импульса непостоянны во времени. Чем меньше размеры и масса частицы, тем более заметными становятся изменения ее импульса во времени.

Факт существования броуновского движения свидетельствует о дискретном строении вещества и беспорядочном движении молекул.

■ Вопросы

1. Как объясняли разнообразие всех тел в природе древнегреческие атомисты? 2. Какое открытие сделал Д. Дальтон и каким образом это открытие обосновывает атомистическую гипотезу? 3. Какие трудности возникли для атомистической гипотезы при исследовании химических соединений веществ в газообразном состоянии? 4. Как разрешил эти трудности Авогадро? 5. В чем состоит закон Авогадро? 6. Что такое количество вещества? 7. В каких единицах выражается количество вещества? 8. Что такое постоянная Авогадро? В каких единицах она выражается? 9. Что такое молярная масса? 10. С помощью каких экспериментальных методов были определены размеры молекул? 11. Что такое атомная единица массы и чему она равна? 12. Какие взгляды на природу теплоты были в науке до утверждения кинетической теории тепловых явлений? 13. Какие опытные факты служат обоснованием молекулярно-кинетической теории? 14. О чем свидетельствует броуновское движение?

■ ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1. В опытах было получено, что в герметичном сосуде, в который помещен радий массой 1 г, за год при нормальных условиях накапливается газообразный гелий объемом $0,156 \text{ см}^3$. Исходя из этих данных, определите, сколько атомов гелия находится в сосуде объемом $22,4 \text{ дм}^3$ при нормальных условиях, если известно, что радий массой 1 г испускает за 1 с $1,48 \cdot 10^{11}$ α -частиц.

$$\begin{aligned} V &= 1,56 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3 \\ V_1 &= 2,24 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3 \\ n &= 1,48 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1} \\ t &= 1 \text{ год} = 365 \cdot 24 \cdot 3600 \text{ с} \end{aligned}$$

$$N_1 - ?$$

Решение

При одинаковых условиях отношение числа атомов гелия равно отношению объемов гелия:

$$\frac{N}{N_1} = \frac{V}{V_1},$$

откуда

$$N_1 = \frac{NV_1}{V}.$$

Общее число атомов гелия, выделившихся за год, равно:

$$N = nt.$$

Отсюда искомое число N_1 атомов равно:

$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{ntV_1}{V} = \frac{1,48 \cdot 10^{11} \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600 \cdot 2,24 \cdot 10^{-2}}{1,56 \cdot 10^{-7}} = \\ &= 6,7 \cdot 10^{23}. \end{aligned}$$

Задача 2. Оцените радиус атома алюминия, приняв, что в алюминии, находящемся в твердом состоянии, атомы располагаются вплотную друг к другу.

Решение

Сначала нужно найти объем V_0 , занимаемый одним атомом алюминия.

$$\begin{aligned} \rho &= 2,7 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3 \\ M &= 2,7 \cdot 10^{-2} \text{ кг/моль} \\ N_A &= 6 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1} \\ r &= ? \end{aligned}$$

Для этого разделим объем V_m , занимаемый 1 моль алюминия в твердом состоянии, на число атомов алюминия в одном моле:

$$V_0 = \frac{V_m}{N_A} = \frac{M}{\rho N_A} = \frac{2,7 \cdot 10^{-2}}{2,7 \cdot 10^3 \cdot 6 \cdot 10^{23}} \text{ м}^3 \approx 1,7 \cdot 10^{-29} \text{ м}^3.$$

Длина l ребра куба, занимаемого атомом, равна:

$$l = \sqrt[3]{V_0} = \sqrt[3]{1,7 \cdot 10^{-29}} \text{ м}^3 \approx 2,6 \cdot 10^{-10} \text{ м}.$$

Считая атом алюминия шаром, вписанным в этот куб, получим, что радиус атома алюминия равен половине ребра этого куба:

$$r = \frac{l}{2} \approx 1,3 \cdot 10^{-10} \text{ м}.$$

Задачи для самостоятельного решения

- 13.1. Сколько молекул кислорода содержится в 1 г воздуха?
- 13.2. Сколько атомов водорода содержится в 100 г воды?
- 13.3. Какое количество вещества содержится в 200 г воды?
- 13.4. Какое количество вещества попадает на экран телевизора за 1 с, если сила тока в электронном луче 10^{-4} А? Заряд одного электрона равен $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.
- 13.5. Оцените диаметр молекулы воды.
- 13.6. В опыте по оценке размеров молекул был использован 0,15%-ный раствор олеиновой кислоты в спирте. При выливании раствора масляной 6 $\cdot 10^{-6}$ кг на поверхность воды, покрытую тальком, образовалось пятно площадью $1,5 \cdot 10^{-2}$ м². Считая слой олеиновой кислоты мономолеку-

лярным, оцените размеры молекулы. Молярная масса олеиновой кислоты 0,282 кг/моль, плотность 895 кг/м³.

13.7. Вычислите массу молекул водорода и кислорода, если их молярные массы соответственно равны $2 \cdot 10^{-3}$ и $3,2 \cdot 10^{-2}$ кг/моль.

13.8. Объем воды в Тихом океане приблизительно равен $7 \cdot 10^8$ км³. Представьте себе, что в океан вылит стакан воды и вся вода в океане хорошо перемешалась. Сколько молекул воды из тех, что были в стакане, снова попадут в стакан при повторном зачерпывании из океана? Объем стакана равен 200 мл.

§ 14 Эксперименты, лежащие в основе молекулярно-кинетической теории

Для принятия теоретической гипотезы в качестве научной физической теории недостаточно ее полного согласия со всеми уже известными опытными фактами, так как именно эти факты и лежат в основе гипотезы.

Важным этапом превращения гипотезы в научную теорию является предсказание новых, неизвестных ранее фактов.

Подтверждение на опыте предсказанного факта называют решающим экспериментом.

Если предсказанные теорией новые физические закономерности или явления экспериментально подтверждаются, то результаты опыта служат доказательством правильности теории.

Закономерности броуновского движения. Важную роль в подтверждении справедливости молекулярно-кинетической теории сыграли опыты французского физика Ж. Перрена по изучению количественных закономерностей броуновского движения, выполненные в 1908—1911 гг. Эти опыты были поставлены после того, как А. Эйнштейн в 1905 г. на основе молекулярно-кинетической теории разработал теорию броуновского движения. А. Эйнштейн доказал, что при хаотическом движении броуновской частицы¹ ее смещение от начального положения должно подчиняться закону:

$$\Delta \bar{x}^2 = \frac{bT\Delta t}{N_A}, \quad (14.1)$$

где $\Delta \bar{x}^2$ — средний квадрат смещения броуновской частицы за время Δt ; b — постоянная, зависящая от формы и размеров броуновской частицы; N_A — постоянная Авогадро; T — абсолютная температура (см. § 16).

Наблюдения Перрена полностью подтвердили этот теоретический результат.

¹ Броуновскими частицами называются мелкие частицы, участвующие в тепловом движении и наблюдаемые в микроскоп.

Распределение молекул по скоростям. Развитию молекулярно-кинетической теории газов способствовала работа английского физика Дж. Максвелла «Пояснения к динамической теории газов» (1860).

В этой работе Максвелл пришел к фундаментальному выводу: молекулы газа движутся с различными скоростями (ранее скорости молекул считали одинаковыми). При столкновении молекул направления и модули векторов их скоростей изменяются, но распределение молекул по возможным значениям скоростей остается неизменным. Исходя из основных положений молекулярно-кинетической теории, Дж. Максвелл вывел закон распределения молекул газа по скоростям.

Проанализируем график, иллюстрирующий максвелловское распределение молекул по скоростям (рис. 2.1). Линия синего цвета характеризует распределение молекул по скоростям при низкой температуре, а черного — при более высокой температуре. На оси абсцисс отложен модуль скорости, на оси ординат — относительное число молекул, скорости которых лежат в интервале значений от v до $v + \Delta v$.

Из рисунка видно, что значительное число молекул движется со скоростью, близкой к значению $v_в$, которая называется *наиболее вероятной скоростью*. Эта скорость зависит от температуры вещества — она уменьшается с понижением температуры. На графике наиболее вероятной скорости соответствует максимум.

Хотя молекулы могут двигаться с любыми скоростями, фактически число молекул, скорость которых значительно отличается от наиболее вероятной, весьма мало. Нулю равно число молекул, скорость которых равна нулю, — это значит, что в веществе нет покоящихся молекул. Число молекул, скорость которых в три раза больше наиболее вероятной, тоже близко к нулю — это значит, что ничтожно мала вероятность того, что молекула приобретет скорость, значительно превышающую наиболее вероятную скорость.

Наконец, с понижением температуры число быстро движущихся молекул уменьшается, а число медленно движущихся возрастает. Максимум кривой распределения смещается влево, и кривая становится более острой.

Наиболее вероятная скорость движения молекул газа по предсказаниям теории при температуре около 0°C должна быть равна нескольким сотням метров в секунду (для молекул

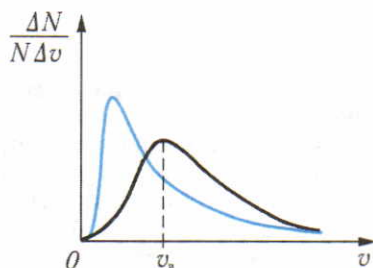


рис. 2.1

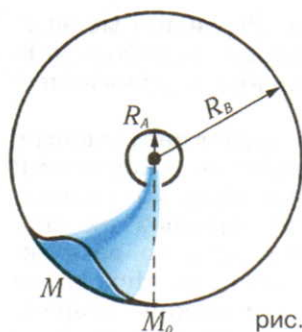


рис. 2.2

водорода — 1500 м/с, кислорода — 380 м/с и т. д.). Этот вывод как будто свидетельствует против теории, так как противоречит факту малой скорости диффузии газов, например при распространении запахов в воздухе.

Прямые измерения скоростей теплового движения молекул были выполнены в 1920 г. О. Штерном в опытах с молекулярными пучками. В качестве исследуемого газа ученый использовал пары

серебра. Серебро испарялось в вакууме с поверхности платиновой проволоки, нагреваемой электрическим током. На пути атомов серебра ставили цилиндрический экран радиусом R_A с узкой щелью. Атомы серебра, пролетевшие сквозь щель, осаждались на стенке второго цилиндра радиусом R_B , образуя узкую полоску около точки M_0 . При вращении прибора вокруг оси, совпадающей с платиновой проволокой, атомы серебра попадали на стенки цилиндра в новое место M (рис. 2.2). По смещению полоски и известной угловой скорости вращения прибора можно было вычислить скорость движения атомов серебра.

В самом деле, за время $t = \frac{R_B - R_A}{v}$, в течение которого атом серебра движется от щели до наружного цилиндра, прибор повернется на угол $\varphi = \omega t$. Поэтому атом попадет уже не в точку M_0 , а в точку M , т. е. полоска сместится на длину дуги

$$\overset{\frown}{M_0 M} = R_B \varphi = R_B \omega t = \frac{R_B \omega (R_B - R_A)}{v}.$$

Измерив длину дуги $\overset{\frown}{M_0 M} = l$ и зная радиусы цилиндров и частоту вращения прибора, можно определить скорость движения атомов серебра:

$$v = \frac{R_B \omega (R_B - R_A)}{l}. \quad (14.2)$$

Найденная таким образом скорость движения атомов серебра совпала со скоростью, рассчитанной по законам молекулярно-кинетической теории.

В опыте Штерна наблюдалось не только смещение, но и размытие полоски из атомов серебра. Это доказывало, что скорости атомов в пучке, вышедшем из щели, разные. Если бы скорость всех атомов была одинаковой, наблюдалось бы только смещение серебряной полоски. Между тем, как видно из выражения (14.2), атомы, смещающиеся на меньшее

расстояние, движутся быстрее, чем атомы, смещающиеся на большее расстояние.

На рисунке 2.2 показано, как зависит толщина слоя серебра от места конденсации атомов, а значит, как зависит число атомов в этом месте от их скорости. Опыт Штерна хорошо согласовывался с распределением молекул по скоростям, вычисленным Дж. Максвеллом.

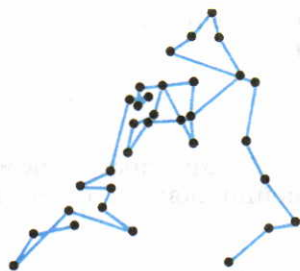


рис. 2.3

■ Вопросы

1. Какие опыты из рассмотренных в этом параграфе можно отнести к решающим? 2. Какие следствия молекулярно-кинетической теории были подтверждены в опытах Перрена? 3. Каким способом можно измерить скорость движения молекул газа? 4. Как можно опытным путем исследовать распределение молекул газа по скоростям? 5. На рисунке 2.3 изображены результаты наблюдений за движением броуновской частицы. Положения частицы через равные промежутки времени отмечены точками и последовательно соединены отрезками. Является ли полученная ломаная линия траекторией движения броуновской частицы? Как изменится картина движения частицы, если уменьшить или увеличить промежутки времени, через которые отмечают положения броуновской частицы?

§ 15 Свойства газов

При создании кинетической теории газов в ее основу были положены следующие экспериментально установленные факты, полученные в опытах с достаточно разреженными газами:

- 1) газы способны неограниченно расширяться и занимать любой предоставленный им объем;
- 2) смесь газов оказывает на стенки сосуда давление, равное сумме давлений каждого из газов, взятых в отдельности (закон Дальтона):

$$p = p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_n;$$

- 3) при постоянной температуре давление данной массы газа обратно пропорционально его объему (закон Бойля — Мариотта):

$$pV = \text{const}; \quad (15.1)$$

- 4) при постоянном объеме давление данной массы газа линейно зависит от температуры (закон Шарля):

$$p = p_0(1 + \alpha t), \quad (15.2)$$

где p — давление газа при температуре t ; p_0 — давление газа при 0°C ; α — температурный коэффициент давления, оди-

наковый для всех газов и по современным измерениям равный

$$\alpha = \frac{1}{273,15} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1} = 0,003661 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1};$$

5) при постоянном давлении объем данной массы газа линейно зависит от температуры (закон Гей-Люссака):

$$V = V_0(1 + \alpha t), \quad (15.3)$$

где V — объем газа при температуре t ; V_0 — объем газа при 0°C ; α — температурный коэффициент объемного расширения, одинаковый для всех газов и равный температурному коэффициенту давления.

Идеальный газ. Первым шагом на пути построения физической теории может быть создание мысленной модели объекта. Любая мысленная модель реального объекта обязательно является упрощением действительности и поэтому имеет определенные границы применимости, в пределах которых она может с успехом использоваться для описания известных свойств и предсказания новых, ранее неизвестных следствий теории.

Примером модели, использованной для теоретического объяснения свойств газов, может служить модель идеального газа.

М. В. Ломоносов считал, что вещества состоят из корпускул, находящихся во вращательном движении, температура тела связана с вращательным движением этих корпускул.

Английский физик Д. Джоуль в 1852 г. предложил более точную модель, приписав молекулам газа поступательное движение. При этом он считал, что скорости всех молекул одинаковы. На основе этих предположений он теоретически вывел закон Бойля — Мариотта, вычислил скорость теплового движения молекул, определил значение абсолютного нуля.

В 1857 г. немецкий физик Р. Клаузиус, используя модель идеального газа, впервые систематически изложил кинетическую теорию газов. Он ввел понятие о средних величинах, длине свободного пробега молекул, вычислил давление газа на стенки сосуда и среднюю длину пути между двумя столкновениями молекул.

Идеальным Клаузиус назвал газ, удовлетворяющий следующим условиям:

1) объемом всех молекул газа можно пренебречь по сравнению с объемом сосуда, в котором этот газ находится;

2) время столкновения молекул друг с другом пренебрежимо мало по сравнению со временем между двумя столкновениями (т. е. временем свободного пробега молекулы);

3) молекулы взаимодействуют между собой только при

непосредственном соприкосновении, при этом они отталкиваются;

4) силы притяжения между молекулами идеального газа ничтожно малы и ими можно пренебречь.

Исходя из этих положений, Клаузиус смог вывести все свойства идеального газа и установить соотношения между его микроскопическими и макроскопическими параметрами.

Микроскопическими параметрами газа называют индивидуальные характеристики молекул. К их числу относятся масса молекулы, ее скорость, импульс и кинетическая энергия поступательного движения. Параметры газа как физического тела называются *макроскопическими*. К ним относятся температура, объем и давление газа. Одной из важнейших задач молекулярно-кинетической теории было установление связи между макроскопическими и микроскопическими параметрами газа.

Давление идеального газа. Используя модель идеального газа, вычислим давление газа на стенку сосуда. Пусть в сосуде произвольной формы находится идеальный газ с концентрацией молекул $n = N/V$, где N — общее число молекул, V — объем сосуда.

Для упрощения задачи предположим, что все молекулы имеют одинаковую массу m_0 , в сосуде находится одно вещество, т. е. один сорт молекул, и все молекулы обладают скоростями, различными по направлению, но одинаковыми по модулю. Выберем на стенке сосуда малый участок площадью S и направим оси координат так, как показано на рисунке 2.4. Поскольку молекулы движутся беспорядочно, то можно считать, что в положительном направлении оси OX движется одна шестая часть всех молекул. Это справедливо и для положительных направлений осей OY и OZ .

Удар молекулы о стенку будем считать упругим (строгое рассмотрение показывает, что конечный результат не зависит от характера соударения молекулы со стенкой). При упругом ударе о стенку импульс молекулы меняется на противоположный, следовательно, изменение импульса равно:

$$\Delta(m_0 v_x) = -m_0 v_x - m_0 v_x = -2m_0 v_x.$$

За время Δt к стенке подлетят все молекулы, расположенные в цилиндре с основанием S и образующей $l = v_x \Delta t$ (рис. 2.4). Число этих молекул равно:

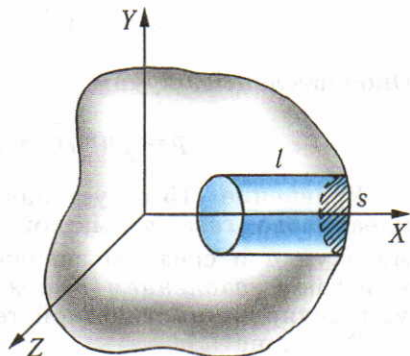


рис. 2.4

$$N = \frac{1}{2} nSl = \frac{1}{2} nSv_x \Delta t.$$

Изменение их импульса равно:

$$N\Delta(m_0v_x) = -2m_0v_x \cdot \frac{1}{2} nSv_x \Delta t.$$

Следовательно, суммарная средняя сила, действующая на молекулы на данном участке, будет по модулю равна $F_x = \frac{N\Delta(m_0v_x)}{\Delta t}$. На стенку согласно третьему закону Ньютона действует сила $\vec{F}$, равная по модулю и противоположная по направлению силе $\vec{F}_x$: $\vec{F} = -\vec{F}_x$. Отсюда

$$F = nSm_0v_x^2. \quad (15.4)$$

Так как все направления для векторов скоростей молекул равновероятны, средние значения квадратов модулей их проекций на координатные оси равны между собой:

$$\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2}.$$

Отсюда следует, что

$$v^2 = 3\overline{v_x^2},$$

и для давления газа на стенку сосуда получаем

$$p = \frac{F}{S} = \frac{1}{3} nm_0v^2 = \frac{2}{3} n \frac{m_0v^2}{2}. \quad (15.5)$$

Учитывая, что на самом деле согласно распределению Максвелла (см. § 14) молекулы движутся с разными скоростями, мы должны в выражение (15.5) вместо квадрата скорости подставить *среднее значение квадрата скорости всех молекул*:

$$\overline{v^2} = \frac{1}{N} (v_1^2 + v_2^2 + v_3^2 + \dots + v_N^2).$$

Окончательно получим

$$p = \frac{1}{3} nm_0\overline{v^2} = \frac{2}{3} n \frac{m_0\overline{v^2}}{2} = \frac{2}{3} n\overline{E_k}. \quad (15.6)$$

Уравнение (15.6) устанавливает связь между давлением идеального газа p , массой молекулы m_0 , концентрацией молекул n и средним значением квадрата скорости $\overline{v^2}$. Его называют *уравнением Клаузиуса* или основным уравнением молекулярно-кинетической теории газов.

Величина

$$\overline{E_k} = \frac{m_0\overline{v^2}}{2} \quad (15.7)$$

есть *средняя кинетическая энергия молекул*, а величина

$$v_{\text{кв}} = \sqrt{v^2} = \sqrt{2\overline{E_k}/m_0} \quad (15.8)$$

называется *средней квадратичной скоростью молекул*.

Из уравнения (15.6) следует, что давление идеального газа равно $2/3$ произведения концентрации молекул n на среднее значение кинетической энергии хаотического поступательного движения молекул $\overline{E_k}$.

Таким образом, с помощью модели идеального газа была установлена связь одного макроскопического параметра газа — его давления на стенки сосуда — с микроскопическими параметрами — массой молекулы, концентрацией молекул и средним значением квадрата скорости их хаотического (теплового) движения, или средним значением кинетической энергии теплового движения молекул.

Выразив плотность вещества через концентрацию n молекул и массу m_0 молекул

$$\rho = nm_0, \quad (15.9)$$

можно получить еще одно уравнение для вычисления давления газа:

$$p = 1/3 \rho v^2. \quad (15.10)$$

■ Вопросы

1. Почему газы способны неограниченно расширяться? 2. Как можно объяснить закон Дальтона для давления смеси газов? 3. Как связаны давление и объем газа при постоянной температуре? 4. Как зависит давление газа от температуры при постоянном объеме? 5. Как зависит объем газа от температуры при постоянном давлении? 6. Что такое идеальный газ? 7. Какую величину называют средней квадратичной скоростью? 8. Какие упрощающие предположения были использованы при выводе основного уравнения молекулярно-кинетической теории для идеального газа?

■ ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1. Считая воздух газом, состоящим из одинаковых молекул, оцените скорость теплового движения молекул газа при нормальных условиях.

Решение. Применим уравнение (15.10), устанавливающее связь давления газа с его плотностью и средним значением квадрата скорости. Из этого уравнения для средней квадратичной скорости молекул газа получим выражение

$$v_{\text{кв}} = \sqrt{v^2} = \sqrt{\frac{3p}{\rho}}.$$

Давление воздуха при нормальных условиях равно примерно $1,01 \cdot 10^5$ Па, плотность $1,29$ кг $\cdot$ м $^{-3}$. Подставляя эти значения, получим

$$v_{\text{кв}} = \sqrt{\frac{1,01 \cdot 10^5}{1,29}} \text{ м/с} = 280 \text{ м/с.}$$

Задача 2. Считая водород в солнечной фотосфере (внешней видимой оболочке Солнца) идеальным газом, определите среднюю кинетическую энергию атомов водорода. Концентрация атомов водорода в фотосфере равна примерно $1,6 \cdot 10^{21}$ м $^{-3}$, давление равно примерно $1,25 \cdot 10^2$ Па.

Решение. Связь между давлением идеального газа, концентрацией и средней кинетической энергией теплового движения частиц выражается основным уравнением молекулярно-кинетической теории (15.6). Отсюда для средней кинетической энергии атомов водорода получим $\overline{E_k} = \frac{3p}{2n}$.

Вычисления дают $\overline{E_k} = \frac{3 \cdot 1,25 \cdot 10^2}{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{21}} \text{ Дж} = 1,2 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$.

■ Задачи для самостоятельного решения

15.1. Масса молекулы водорода равна $3,3 \cdot 10^{-27}$ кг. Считая водород идеальным газом, вычислите его давление на стенки сосуда при концентрации 10^{25} м $^{-3}$ и средней квадратичной скорости теплового движения молекул 700 м/с.

15.2. Концентрация молекул межзвездного газа в среднем равна 1 м $^{-3}$, средняя кинетическая энергия молекул газа $1,5 \cdot 10^{-21}$ Дж. Определите давление межзвездного газа.

15.3. Определите среднюю кинетическую энергию поступательного движения молекул идеального газа с концентрацией $3 \cdot 10^{25}$ м $^{-3}$ при давлении 10^5 Па.

15.4. Концентрации молекул идеального газа и их средние квадратичные скорости в двух сосудах одинаковы. Масса молекулы газа во втором сосуде в два раза больше, чем в первом. Каково отношение давлений p_1/p_2 ?

15.5. Чему равна концентрация молекул воздуха в колбе радиолампы, если давление внутри колбы равно 10^{-5} Па, а средняя кинетическая энергия молекул воздуха равна $5 \cdot 10^{-21}$ Дж?

§ 16

Температура и способы ее измерения

Температура. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа устанавливает связь легко измеряемого макроскопического параметра — давления с такими микроскопическими параметрами газа, как средняя кинетическая энергия и концентрация молекул. Но, измерив давление газа, мы не сможем узнать по отдельности ни среднее значение кинетической энергии молекул, ни их концентрацию. Следовательно, для нахождения микроскопических

параметров газа нужны измерения еще какой-то физической величины, связанной либо с концентрацией, либо со средней кинетической энергией молекул.

Еще в XVIII в. М. В. Ломоносов высказал предположение о том, что изменение скорости хаотического движения молекул связано с изменением *температуры* тела.

Понятие температуры тела представляется на первый взгляд простым и понятным. Из собственного повседневного опыта каждый знает, что бывают тела горячие и холодные. Еще с детства нам знакомы выражения «температура на улице» и «температура при заболевании» и т. п.

Опыты и наблюдения показывают, что при контакте двух тел, из которых одно мы воспринимаем как горячее, а другое как холодное, происходят изменения физических параметров как первого, так и второго тела. Процесс передачи энергии, происходящий при контакте горячего и холодного тел и сопровождающийся изменениями ряда физических параметров, называется *теплопередачей*.

Через некоторое время после установления контакта между любыми телами изменения макроскопических параметров тел прекращаются. Такое состояние тел называется *тепловым равновесием*. Во всех частях системы тел, находящихся в состоянии теплового равновесия, температура одинакова. Если при контакте двух тел никакие их физические параметры, например объем, давление, не изменяются, то между телами нет теплопередачи и их температура одинакова. Температура как макроскопический физический параметр определяет возможность теплопередачи от одного тела к другому и направление теплопередачи.

Жидкостный термометр. В повседневной жизни наиболее распространен способ измерения температуры с помощью жидкостного термометра. Здесь для измерения температуры используется свойство жидкостей расширяться при нагревании. В качестве рабочего тела обычно используют ртуть (для измерения температур от -35 до 750°C), спирт (от -80 до 70°C), пентан (от -200 до 35°C). Для измерения температуры тела термометр приводят с ним в контакт, между телом и термометром осуществляется процесс теплопередачи до установления теплового равновесия. Чтобы процесс измерения не изменил заметно температуру тела, масса термометра должна быть значительно меньше массы тела, температура которого измеряется.

Изменение объема жидкости в термометре прекращается, когда между телом и термометром прекращается теплопередача. При этом температура жидкости в термометре равна температуре тела. Отметив на трубке термометра положение конца столбика жидкости при помещении термометра сначала в тающий лед (рис. 2.5), а затем в кипящую воду

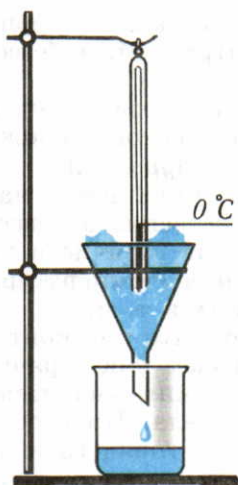


рис. 2.5

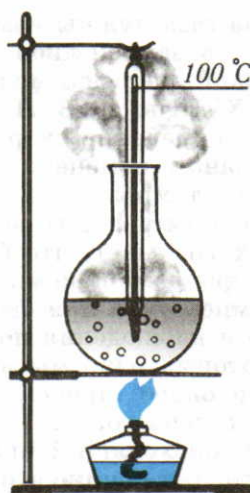


рис. 2.6

(рис. 2.6) при нормальном давлении и разделив отрезок между этими отметками на 100 равных частей, получают температурную шкалу по Цельсию (Международную практическую шкалу температур). Здесь в качестве первичных (основных) точек температурной шкалы приняты температура таяния льда при нормальном атмосферном давлении (101 325 Па) и температура кипения воды при тех же условиях. Им приписаны значения 0°C и 100°C , единица температуры в Международной практической шкале температур называется градусом Цельсия — 1°C .

Существенным недостатком рассмотренного способа измерения температуры с помощью жидкостных термометров является то, что понятие температуры при этом оказывается связанным с конкретными физическими свойствами определенного вещества, используемого в качестве рабочего тела в термометре — ртути, спирта и т. п. Изменение объема различных жидкостей при одинаковом нагревании оказывается несколько различным. Поэтому ртутный и спиртовой термометры, показания которых совпадают при 0°C и 100°C , дают несколько разные показания при других температурах.

Следовательно, обнаруживаемые в опытах зависимости каких-либо физических величин от температуры, определяемой по жидкостному термометру, могут быть связаны с особенностями изменения объема жидкости при нагревании.

Газовый термометр. В конце XVIII в. Шарль установил, что одинаковое нагревание любого газа приводит к одинаковому повышению давления, если при этом объем остается постоянным. При измерении температуры по шкале Цельсия

зависимость давления газа от температуры при постоянном объеме выражается линейным законом (15.2). А отсюда следует, что давление газа (при $V = \text{const}$) можно принять в качестве количественной меры температуры. Соединив сосуд, в котором находится газ, с манометром и проградуировав прибор, можно измерять температуру по показаниям манометра (рис. 2.7). Такой прибор называется *газовым термометром*. В широких пределах из-

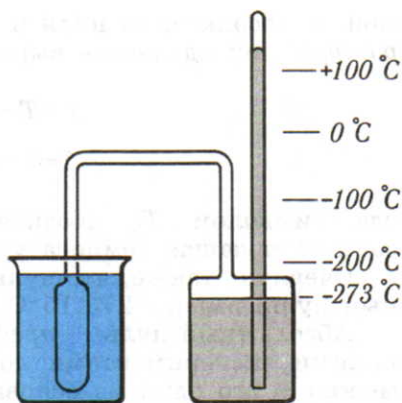


рис. 2.7

менений концентраций газов и температур и малых давлениях температурный коэффициент давления разных газов примерно одинаковый, поэтому способ измерения температуры с помощью газового термометра оказывается мало зависящим от свойств конкретного вещества, используемого в термометре в качестве рабочего тела. Наиболее точные результаты получаются, если в качестве рабочего тела использовать водород или гелий.

Абсолютная температурная шкала (термодинамическая шкала температур). Выбор в качестве первичных (основных) точек температурной шкалы точек таяния льда и кипения воды совершенно произволен. Полученная таким образом температурная шкала оказалась неудобной для теоретических исследований. В связи с этим появилась необходимость в создании другой температурной шкалы, менее тесно связанной со свойствами какого-то одного конкретного вещества. Так появилась *абсолютная температурная шкала*, которая в настоящее время называется *термодинамической шкалой температур*.

Впервые такую шкалу предложил в 1848 г. У. Томсон (лорд Кельвин), по его имени эту шкалу иногда называют шкалой Кельвина. При построении этой шкалы он исходил из законов термодинамики.

Упрощенно понятие абсолютной температуры можно ввести следующим образом. Из выражения (15.2) следует, что, если вещество до температуры $-273,15^\circ\text{C}$ остается в газообразном состоянии, его давление при этой температуре должно стать равным нулю. Эту температуру выбрали за начало отсчета новой температурной шкалы — *абсолютный нуль*, а за единицу температуры по абсолютной шкале приняли 1 кельвин (К), равный 1°C . Связь между температурой t по шкале Цельсия и температурой T в кельвинах, отсчитывае-

мой от абсолютного нуля и называемой *абсолютной температурой*, определяется выражениями:

$$t = T - T_0, \quad (16.2)$$

$$T = t + T_0, \quad (16.3)$$

где символом T_0 обозначена абсолютная температура, соответствующая температуре 0°C и равная $273,15\text{ К}$.

Очевидно также, что нуль по абсолютной шкале (абсолютный нуль) равен $-273,15^\circ\text{C}$.

Абсолютный нуль — *предельно низкая температура*. Никакими экспериментами достичь абсолютного нуля невозможно — это один из основных законов природы. Чем ближе температура охлаждаемого тела к абсолютному нулю, тем труднее идет дальнейшее охлаждение. В настоящее время с помощью весьма сложных методов удалось достичь самой низкой на практике температуры, равной $0,0001\text{ К}$. Более низкие температуры пока не достигнуты.

Из уравнений (15.2) и (16.2) следует, что при постоянном объеме связь давления идеального газа с температурой по абсолютной шкале определяется выражением:

$$p = p_0 [1 + \alpha (T - T_0)] = p_0 \alpha T. \quad (16.4)$$

Температура как мера средней кинетической энергии молекул. Из выражения (16.4), являющегося определением понятия абсолютной температуры, и основного уравнения молекулярно-кинетической теории газов (15.6) можно найти связь между средней кинетической энергией теплового движения молекул идеального газа и абсолютной температурой газа:

$$E = \frac{3}{2} \frac{p}{n} = \frac{3}{2} \frac{p_0 \alpha T}{n}. \quad (16.5)$$

Используя представления молекулярно-кинетической теории, можно строго доказать, что при постоянной температуре средняя кинетическая энергия теплового движения молекул идеального газа имеет постоянное значение независимо от давления и объема газа. Следовательно, отношение p/n является постоянной величиной и можно ввести обозначение:

$$\frac{p_0 \alpha}{n} = k. \quad (16.6)$$

Тогда из выражений (16.5) и (16.6) получаем:

$$E = \frac{3}{2} kT, \quad (16.7)$$

где коэффициент k называется *постоянной Больцмана*. Средняя кинетическая энергия теплового движения молекул идеального газа пропорциональна первой степени абсолютной температуры газа. Численное значение постоянной Больцмана равно:

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1}.$$

Мы получили, что температура тела, измеряемая с помощью макроскопического прибора — термометра, имеет в молекулярно-кинетической теории смысл микроскопического параметра, являясь величиной, прямо пропорциональной средней кинетической энергии хаотического движения молекул. Другими словами, в молекулярной физике можно с равным основанием измерять энергию теплового движения атомов или молекул в кельвинах или джоулях.

Постоянная Больцмана имеет физический смысл переводного множителя для перевода единицы энергии «джоуль» в единицу температуры «кельвин».

Используя выражения (15.6) и (16.7), зависимость давления идеального газа от абсолютной температуры можно выразить:

$$p = nkT. \quad (16.8)$$

Таким образом, давление идеального газа оказывается прямо пропорциональным концентрации молекул и абсолютной температуре газа.

■ Вопросы

1. По какому признаку можно судить о равенстве температур двух тел?
2. Какое свойство жидкостей используется для измерения температуры с помощью ртутного и спиртового термометров?
3. Как строится шкала температур по Цельсию? Что принято за первичные (основные) точки этой шкалы?
4. Какими недостатками обладают жидкостные термометры?
5. Как устроен газовый термометр?
6. В чем преимущество газового термометра перед жидкостным?
7. Как строится абсолютная температурная шкала? Что принято за единицу абсолютной (термодинамической) температуры?
8. Каково соотношение между температурами по шкале Цельсия и шкале Кельвина?
9. Какую связь устанавливает молекулярно-кинетическая теория между абсолютной температурой идеального газа и средней кинетической энергией хаотического движения его молекул?

■ ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1. Вычислите среднюю кинетическую энергию молекул идеального газа при температуре 27°C .

Решение. Средняя кинетическая энергия $\overline{E_k}$ теплового движения молекул идеального газа связана с абсолютной температурой T

газа уравнением (16.7). Для вычисления средней кинетической энергии молекул температуру газа по шкале Цельсия нужно перевести в температуру по абсолютной шкале $T = (273,15 + 27) \text{ К} \approx 300 \text{ К}$.

Подставляя значение температуры и постоянную Больцмана, находим среднюю кинетическую энергию молекул идеального газа:

$$\overline{E_k} = 3/2 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К} \cdot 300 \text{ К} = 6,2 \cdot 10^{-21} \text{ Дж}.$$

Задача 2. Основываясь на представлениях молекулярно-кинетической теории, оцените давление и температуру внутри Солнца. Масса Солнца $M_C = 2 \cdot 10^{30} \text{ кг}$, радиус $R_C = 7 \cdot 10^8 \text{ м}$. Для простоты расчетов можно считать, что Солнце состоит в основном из атомарного водорода.

Решение. Согласно молекулярно-кинетической теории давление газа p связано с его температурой T и концентрацией молекул n соотношением $p = nkT$, отсюда $T = \frac{p}{nk}$.

Поскольку Солнце не расширяется и не сжимается, давление его внутренних слоев на любой глубине равно давлению внешних слоев, создаваемому силой тяжести F . Отсюда следует, что для определения температуры на какой-то глубине внутри Солнца необходимо определить концентрацию атомов n на этой глубине и давление вышележащих слоев p .

Для упрощения будем определять температуру на расстоянии $R_C/2$ от центра Солнца, где концентрацию атомов водорода будем считать приближенно равной среднему значению для Солнца $n \approx n_{\text{cp}} = \frac{\rho_{\text{cp}} N_A}{M}$, где $M = 10^{-3} \text{ кг/моль}$ — молярная масса атомарного водорода.

Выделим вертикальный столб газа с площадью основания S ; давление верхних слоев на лежащие ниже в этом столбе можно оценить, пренебрегая зависимостью плотности газа от глубины. Примем расстояние от центра Солнца до центра масс верхней половины столба газа равным $\frac{3}{4} R_C$ и рассчитаем силу тяготения, учитывая, что этот слой притягивается веществом, находящимся внутри слоя

на расстоянии, меньшем $\frac{3}{4} R_C$ (его масса равна $M_1 = \frac{M_C \left(\frac{3}{4} R_C\right)^3}{R_C^3} = \frac{27}{64} M_C$):

$$F \approx \frac{27 G m M_C}{64 \left(\frac{3}{4} R_C\right)^2} = \frac{27 G \rho_{\text{cp}} \frac{R_C}{2} S M_C}{64 \left(\frac{3}{4}\right)^2 R_C^2} = \frac{3 G \rho_{\text{cp}} S M_C}{8 R_C}.$$

Давление на искомой глубине равно

$$p = \frac{F}{S} = \frac{3}{8} \frac{G \rho_{\text{cp}} M_C}{R_C} = \frac{3 G M_C^2}{8 R_C \frac{4}{3} \pi R_C^3} = \frac{9 G M_C^2}{32 \pi R_C^4},$$

а температура

$$T = \frac{p}{nk} = \frac{G\rho_{\text{ср}} M_{\text{С}} M}{\frac{9}{8} R_{\text{С}} \rho_{\text{ср}} N_{\text{А}} k} = \frac{8 G M_{\text{С}} M}{9 R_{\text{С}} N_{\text{А}} k}.$$

Подставив числовые значения, получим оценку давления и температуры:

$$p \approx 10^{14} \text{ Па}; T \approx 10^7 \text{ К}.$$

Итак, в недрах Солнца давление газа примерно в миллиард раз превышает нормальное атмосферное давление, а температура составляет около 10 млн К. Эти результаты близки к полученным более строго.

■ Задачи для самостоятельного решения

16.1. Чему равно отношение средних квадратичных скоростей молекул водорода и кислорода при одинаковых температурах газов?

16.2. Для осуществления физического эксперимента необходимо разогреть в замкнутом сосуде водород до температуры $2 \cdot 10^8$ К. Какова максимально допустимая концентрация атомов водорода в сосуде, если стенки сосуда могут выдержать давление 10^6 Па?

16.3. Температура атмосферы Солнца — фотосферы — равна 6000 К, концентрация атомов составляет примерно 10^{15} частиц/см³. Предполагая, что фотосфера состоит в основном из атомарного водорода, определите давление и плотность солнечной атмосферы.

§ 17 Уравнение состояния идеального газа

Используя зависимость давления идеального газа от его температуры и концентрации молекул [см. формулу (16.8)], можно найти связь между основными макроскопическими параметрами газа — его массой m , объемом V , давлением p и температурой T .

Концентрация n молекул газа равна:

$$n = \frac{N}{V}, \quad (17.1)$$

где N — число молекул газа в сосуде объемом V .

Число N можно представить как произведение количества вещества ν , выраженного в молях, на постоянную Авогадро $N_{\text{А}}$:

$$N = \nu N_{\text{А}}. \quad (17.2)$$

Из выражений (16.8), (17.1) и (17.2) получим

$$pV = \nu N_{\text{А}} k T. \quad (17.3)$$

Произведение постоянной Авогадро $N_{\text{А}}$ на постоянную Больц-

мана k называется *молярной газовой постоянной* R . Молярная газовая постоянная равна:

$$R = N_A k \approx 6 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К} \approx 8,31 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}.$$

Используя молярную газовую постоянную R , выражение (17.3) преобразуем к виду

$$pV = \nu RT. \quad (17.4)$$

Количество вещества ν можно найти, если известна масса вещества m и его молярная масса M :

$$\nu = \frac{m}{M}.$$

С учетом этого выражение (17.4) можно записать в такой форме:

$$pV = \frac{m}{M} RT. \quad (17.5)$$

Полученное выражение называется *уравнением состояния идеального газа*. Оно может быть записано и так:

$$p = \frac{1}{M} \rho RT, \quad (17.6)$$

где ρ — плотность газа.

Опытная проверка уравнения состояния идеального газа. Уравнение (17.5) мы получили, применив основные представления молекулярно-кинетической теории к идеальному газу. Для того чтобы проверить, можно ли использовать это уравнение на практике для описания физических процессов в газах, можно выполнить эксперимент с атмосферным воздухом, заключенным в гофрированном сосуде — *сильфоне* (рис. 2.8).

Верхняя крышка сильфона соединена со стержнем, имеющим винтовую резьбу. Вращением этого стержня можно

поднимать или опускать крышку сильфона, растягивая или сжимая сильфон и изменяя тем самым его объем. Шкала на боковой планке позволяет измерить объем сильфона в условных единицах. Для измерения давления воздуха сильфон подключают к манометру. Температуру воздуха можно изменять, нагревая или охлаждая сильфон.

Из уравнения состояния идеального газа (17.5) следу-

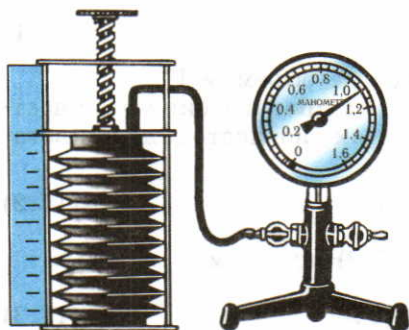


рис. 2.8

ет, что при постоянных значениях массы m газа и молярной массы M отношение произведения давления p газа на объем V к абсолютной температуре T должно иметь постоянное значение при любых изменениях этих параметров:

$$\frac{pV}{T} = \frac{mR}{M} = \text{const.} \quad (17.7)$$

Проверим, выполняется ли равенство (17.7) для воздуха.

При обоих открытых кранах манометра установим с помощью вращения рукоятки винта объем сиффона $V_1 = 0,8V_m$, где V_m — максимальный объем сиффона. Закроем кран на свободном конце трубки манометра. Давление воздуха в сиффоне равно нормальному атмосферному давлению ($p_1 = 10^5$ Па). Определим по термометру температуру, выразим ее в кельвинах.

Измеренные значения объема, давления, абсолютной температуры воздуха занесем в таблицу. Вычислим отношение

$$\frac{p_1 V_1}{T_1}.$$

Поместим сиффон в сосуд с горячей водой и уменьшим объем воздуха в сиффоне до $V_2 = 0,6V_m$. Измерив давление p_2 и температуру T_2 , вычислим отношение $\frac{p_2 V_2}{T_2}$.

Поместим сиффон в сосуд с холодной водой и увеличим объем воздуха в сиффоне до $V_3 = V_m$. Измерим давление p_3 и температуру T_3 . Вычислим отношение $\frac{p_3 V_3}{T_3}$. Сравнив все три отношения, мы увидим, что для воздуха в сиффоне в пределах границ ошибки измерений выполняется равенство:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} = \frac{p_3 V_3}{T_3}.$$

Следовательно, уравнение состояния идеального газа в пределах погрешности эксперимента применимо для описания свойств реального газа — воздуха.

Опыты более точные, чем проделанные нами, показывают, что при температурах, далеких от абсолютного нуля, и малых значениях плотности уравнения (17.5) и (17.6) могут быть использованы для описания свойств любых реальных газов.

Уравнение, устанавливающее связь между давлением, объемом и температурой газа, было впервые получено французским физиком Б. Клапейроном. В форме (17.5) для случая $\nu = 1$ моль его вывел русский химик Д. И. Менделеев, поэтому уравнение состояния газа (17.5) называется *уравнением Клапейрона — Менделеева*.

Вопросы

1. Каким образом можно проверить применимость уравнения состояния идеального газа для описания свойств реальных газов? 2. При каких условиях свойства реальных газов близки к свойствам идеального газа? 3. При каких условиях свойства реальных газов существенно отличаются от свойств идеального газа?

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Задача. При температуре 27°C и давлении 10^5 Па объем воздушного шара, заполненного гелием, равен 500 м^3 . Каким будет объем этого шара при подъеме в верхние слои атмосферы, где его температура понизится до -33°C , а давление окружающего воздуха станет равным $5 \cdot 10^4$ Па? Массу гелия считать постоянной.

Решение

$$\begin{aligned} p_1 &= 10^5 \text{ Па} \\ V_1 &= 500 \text{ м}^3 \\ T_1 &= 300 \text{ К} \\ p_2 &= 5 \cdot 10^4 \text{ Па} \\ T_2 &= 240 \text{ К} \\ m_1 &= m_2 = m \\ V_2 &= ? \end{aligned}$$

Из уравнения состояния идеального газа $pV = \frac{m}{M}RT$ следует, что при $m = \text{const}$ выполняется равенство

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}.$$

Отсюда $V_2 = \frac{p_1 V_1 T_2}{T_1 p_2}$;

$$V_2 = \frac{10^5 \cdot 500 \cdot 240}{300 \cdot 5 \cdot 10^4} \text{ м}^3 = 800 \text{ м}^3.$$

Задачи для самостоятельного решения

17.1. Используя уравнение состояния идеального газа, вычислите по четырем параметрам, представленным в таблице 2, пятый, неизвестный параметр.

Таблица 2

m , кг	M , кг/моль	p , Па	V , м ³	T , К
8	$4 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^5$	16,6	x_1
$2 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$8,3 \cdot 10^3$	x_2	200
64	$32 \cdot 10^{-3}$	x_3	24,9	300
7	x_4	10^5	8,3	400
x_5	$44 \cdot 10^{-3}$	10^7	$2,49 \cdot 10^{-2}$	300

17.2. Плотность неона в баллоне неоновой лампы $0,05\text{ кг/м}^3$ при давлении $5 \cdot 10^3$ Па. Определите температуру газа.

17.3. Под каким давлением находится углекислый газ в огнетушителе объемом 2 дм^3 , если масса огнетушителя до заполнения газом была $4,2\text{ кг}$, а после заполнения $5,6\text{ кг}$? Температуру газа считать равной 37°C .

17.4. В среднем человек потребляет в сутки примерно 1 кг кислорода. В комнате какого объема при нормальных условиях содержится столько кислорода в воздухе? Парциальное давление кислорода 21 кПа.

17.5. Физический кабинет имеет размеры $6 \times 12 \times 3$ м. Определите массу воздуха в кабинете при температуре 27°C и нормальном атмосферном давлении.

17.6. В баллоне лампы дневного света объемом 250 см^3 находится аргон под давлением $5 \cdot 10^2$ Па при температуре 17°C . Определите массу аргона.

17.7. При температуре 17°C в баллоне вместимостью 30 дм^3 находится 5,4 кг газа под давлением 10 МПа. Какой это газ?

17.8. Объем баллона электрической лампы накаливания 150 см^3 . Внутри находится 0,4 г газа при температуре 30°C и давлении $8 \cdot 10^4$ Па. Каким газом наполнена лампа?

17.9. Объем камеры насоса равен V_0 . За сколько циклов работы насоса можно накачать автомобильную камеру объемом V от давления p_1 до давления p_2 ? Температуру газа считать постоянной.

17.10. Как изменится объем пузырька воздуха при подъеме его со дна озера глубиной 20 м к поверхности воды? Температура на дне равна 10°C , на поверхности 25°C .

17.11. В конце процесса сжатия газа в цилиндре карбюраторного двигателя внутреннего сгорания давление было $9 \cdot 10^5$ Па, в конце процесса сгорания топлива стало равным $3,5 \cdot 10^6$ Па. Определите температуру газа в цилиндре в конце процесса сгорания топлива. Температура в конце процесса сжатия равна 400°C . Поршень во время сгорания топлива можно считать неподвижным.

17.12. При изготовлении электролампы накаливания баллон заполняют инертным газом. Давление газа при 20°C составляет $8 \cdot 10^4$ Па. Какое давление устанавливается в баллоне работающей электролампы при температуре 425 K ? Объем считать постоянным.

17.13. Воздушный шар объемом 10^3 м^3 заполнен гелием. При нормальных условиях он может поднять полезный груз массой 10^3 кг. Какой груз может поднять тот же воздушный шар при замене гелия водородом при той же температуре?

17.14. Пропускная способность газопровода ограничена давлением, которое могут выдержать трубы. Для повышения пропускной способности используется охлаждение газа. До какого значения нужно понизить температуру газа, чтобы увеличить пропускную способность в 1,5 раза по сравнению с его пропускной способностью при температуре 500 K ?

17.15. В цилиндре дизельного двигателя объем воздуха при сжатии поршнем уменьшается в 20 раз, давление увеличивается от 10^5 до $6 \cdot 10^6$ Па. Какова температура воздуха в конце процесса сжатия, если в начале процесса сжатия она равна 27°C ?

17.16*. Как изменится температура газа при расширении, если его состояние изменяется по закону $pV^n = b$, где $b = \text{const}$?

17.17*. Два сосуда объемами V_1 и V_2 заполнены идеальным газом при давлениях p_1 и p_2 . Какое установится давление в сосудах, если их соединить между собой? Температура газа постоянна.

17.18*. Воздушный шар объемом 240 м^3 , заполненный водородом при температуре 300 K , поднимает полезный груз массой 300 кг. Какой полезный груз сможет поднять воздушный шар, если заполнить его горячим воздухом при температуре 400 K ? До какой температуры нужно нагреть воздух, чтобы воздушный шар смог поднять такой же полезный груз, как и при заполнении его водородом?

17.19. В трубке имеется столбик ртути длиной 10 см, отделяющий некоторый объем воздуха внутри трубки. При вертикальном положении трубки открытым концом вниз длина столбика воздуха над столбиком ртути равна 30 см, при горизонтальном же положении трубки длина столбика воздуха 26 см. Определите по этим данным атмосферное давление воздуха.

17.20. Цилиндр разделен герметичной теплоизолирующей подвижной перегородкой. При одинаковой температуре по одну сторону перегородки находится 1 моль гелия, по другую — 1 моль водорода. Как изменится давление в сосуде при повышении температуры гелия в 2 раза, если температура водорода при этом не изменится?

17.21. В вертикально расположенной стеклянной трубке, площадь поперечного сечения которой S , находится водород, количество вещества которого равно ν , а над ним — столбик ртути. При нагревании водорода на ΔT столбик ртути поднялся на высоту h . Определите массу ртути в трубке, если атмосферное давление в опыте было постоянно и равно p_0 .

17.22. Докажите, что объем одного моля любого идеального газа при нормальных условиях равен $2,24 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3$.

§ 18 Изопроцессы в газах

Многие процессы в газах, происходящие в природе и осуществляемые в технике, происходят так, что изменяются лишь два параметра из пяти. Рассмотрим три таких процесса — изотермический, изохорный и изобарный.

Изотермический процесс. *Изотермическим* называется процесс, протекающий при постоянной температуре. Из уравнения состояния идеального газа (17.5) следует, что при постоянной температуре и неизменных значениях массы газа и его молярной массы произведение давления газа на его объем должно оставаться постоянным:

$$pV = \text{const.} \quad (18.1)$$

Обозначив постоянную $\frac{m}{M}RT$ через b , уравнение (18.1) представим в виде

$$p = \frac{b}{V}. \quad (18.2)$$

Изотермический процесс можно осуществить, например, путем изменения объема сильфона при постоянной температуре. График уравнения (18.2) изотермического процесса называется *изотермой*. Изотерма, изображенная в прямоугольной системе координат, по оси ординат которой отсчитывается давление газа, а по оси абсцисс — его объем, является гиперболой (рис. 2.9).

Уравнение (18.1), устанавливающее связь между давлением и объемом газа при постоянной температуре, было получено из эксперимента до создания молекулярно-кинетической теории газов английским физиком Р. Бойлем (1662) и французским физиком Э. Мариоттом (1676). Поэтому его называют *законом Бойля — Мариотта*.

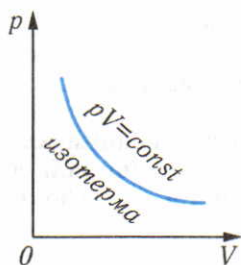


рис. 2.9

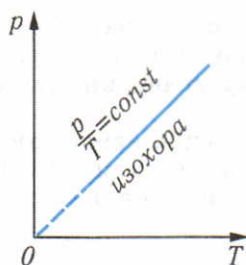


рис. 2.10

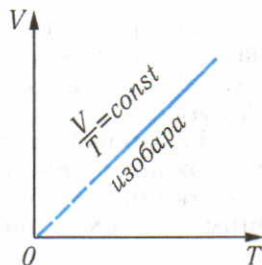


рис. 2.11

Изохорный процесс. *Изохорным* процессом называется процесс, протекающий при неизменном объеме V . Уравнение изохорного процесса при условии $m = \text{const}$ и $M = \text{const}$ имеет вид

$$\frac{p}{T} = \text{const}, \quad (18.3)$$

или

$$p = p_0 \alpha T, \quad (18.4)$$

где p_0 — давление газа при температуре 0°C ; α — температурный коэффициент давления, равный $1/273,15 \text{ K}^{-1}$.

График уравнения изохорного процесса называется *изохорой*. Изохора, изображенная в прямоугольной системе координат, по оси ординат которой отсчитывается давление газа, а по оси абсцисс — его абсолютная температура, является прямой, продолжение которой проходит через начало координат (рис. 2.10). Экспериментальным путем зависимость давления газа от температуры исследовал в 1787 г. французский физик Ж. Шарль. Поэтому уравнение (18.4) называют *законом Шарля*.

Изохорный процесс можно осуществить, например, нагреванием воздуха в сильфоне при постоянном объеме.

Изобарный процесс. *Изобарным* процессом называется процесс, протекающий при неизменном давлении p .

Уравнение изобарного процесса при условии $m = \text{const}$ и $M = \text{const}$ имеет вид

$$\frac{V}{T} = \text{const}, \quad (18.5)$$

или

$$V = V_0 \alpha T, \quad (18.6)$$

где V_0 — объем, занимаемый газом при температуре 0°C ; коэффициент α равен $1/273,15 \text{ K}^{-1}$.

График уравнения изобарного процесса называется *изобарой*. Изобара, изображенная в прямоугольной системе координат, где на оси ординат отсчитывается объем газа, а на оси абсцисс — его абсолютная температура, является прямой, продолжение которой проходит через начало координат (рис. 2.11).

Экспериментальное исследование зависимости объема газа от температуры провел в 1802 г. французский физик Ж. Гей-Люссак. Поэтому уравнение (18.6) называют *законом Гей-Люссака*.

Изобарный процесс можно наблюдать при нагревании или при охлаждении воздуха в стеклянной колбе, соединенной со стеклянной трубкой, отверстие в которой закрыто небольшим столбом жидкости.

■ Вопросы

1. Приведите примеры изотермических процессов в природе и технике.
2. Приведите примеры изобарных процессов в природе и технике.
3. Приведите примеры изохорных процессов в природе и технике.
4. Покажите, что уравнение (18.4) является следствием уравнения состояния идеального газа для изохорного процесса.
5. Покажите, что уравнение (18.6) является следствием уравнения состояния идеального газа для изобарного процесса.

■ ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1. Постройте график изотермического процесса идеального газа при температуре 300 К.

Начальное давление и объем соответственно равны 9 кПа и 2 м^3 , конечное давление равно 2 кПа.

Решение. Для построения графика изотермического процесса в координатных осях p, V будем откладывать по оси абсцисс значения объема газа, по оси ординат — значения давления. Масштаб выберем таким, чтобы начальные и конечные значения давления и объема укладывались на графике. Точку графика, соответствующую начальному состоянию газа, найдем на пересечении двух прямых: параллельной оси ординат, она пересекает ось абсцисс в точке $V_1 = 2 \text{ м}^3$, и параллельной оси абсцисс — пересекает ось ординат в точке $p_1 = 9 \text{ кПа}$.

Для нахождения остальных точек графика необходимо воспользоваться уравнением изотермического процесса и найти значения объема $V_2, V_3, \dots, V_n$, соответствующие выбранным значениям давления $p_2, p_3, \dots, p_n$. Получим

$p, \text{ кПа}$	9	8	7	6	5	4	3	2
$V, \text{ м}^3$	2	2,35	2,57	3	3,6	4,5	6	9

По найденным значениям объема газа при выбранных значениях давления нанесем точки, через которые проведем кривую, которая и будет графиком изотермического процесса в координатных осях $p-V$ (рис. 2.12).

Построение графиков изотермического процесса в координатных осях $V-T$ и $p-T$ является более простой задачей.

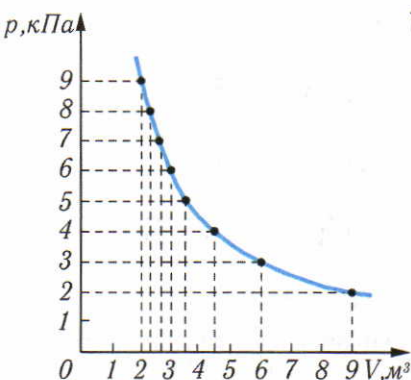


рис. 2.12

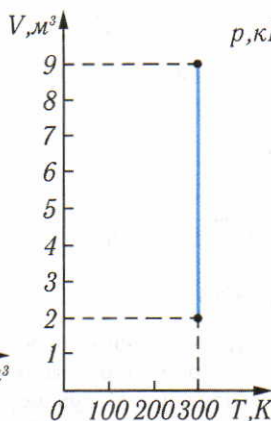


рис. 2.13

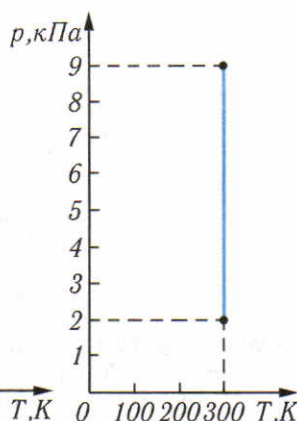


рис. 2.14

При выборе оси абсцисс для отсчета значений температуры газа графики изотермических процессов представляют собой прямые, параллельные оси ординат. Продолжение каждой из этих прямых до оси абсцисс пересекает ее в точке, соответствующей значению температуры изотермического процесса. Ординаты верхней и нижней точек этих графиков определяются начальными и конечными значениями объема газа (рис. 2.13) и его давления (рис. 2.14).

Задача 2. По графику процесса, осуществленного с идеальным газом (рис. 2.15), постройте графики этого процесса в координатных осях p , T и V , T . Температура газа в начальном состоянии была равна 250 К.

Решение. График показывает, что давление газа при переходе из состояния 1 в состояние 2 увеличилось в 3 раза, а объем в течение всего процесса оставался неизменным. Следовательно, процесс изменения состояния газа был изохорным. При изохорном процессе связь между давлением газа p и абсолютной температурой T выражается уравнением

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}.$$

Отсюда

$$T_2 = \frac{p_2 T_1}{p_1} = \frac{3 \cdot 10^5 \cdot 250 \text{ К}}{10^5} = 750 \text{ К}.$$

По известным начальным и конечным значениям давления и температуры построим в системе координат с осями p , T точки 1 и 2, соответствующие начальному и конечному состояниям газа. Зависимость давления p от температуры T линейная, следова-

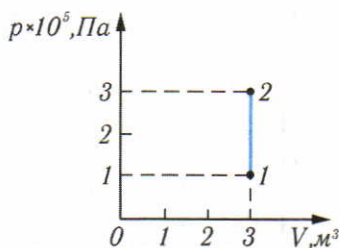


рис. 2.15

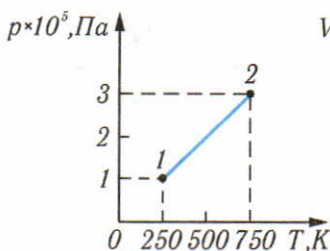


рис. 2.16

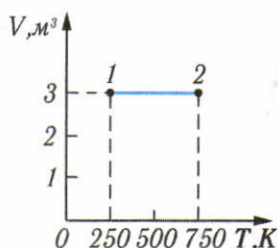


рис. 2.17

тельно, график изохорного процесса в координатных осях $p-T$ является прямой, проходящей через точки 1 и 2 (рис. 2.16).

В координатных осях $V-T$ график изохорного процесса — это отрезок прямой, параллельной оси абсцисс (рис. 2.17).

■ Задачи для самостоятельного решения

18.1. Постройте график изотермического процесса при температуре 300 К в координатных осях $p-V$, $V-T$ и $p-T$. Начальные значения давления и объема газа соответственно равны $p_1 = 10^5$ Па, $V_1 = 16$ м³, конечное давление $p_2 = 1,6 \cdot 10^6$ Па.

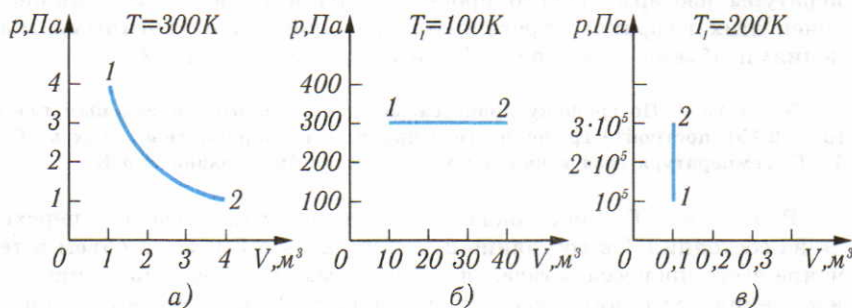


рис. 2.18

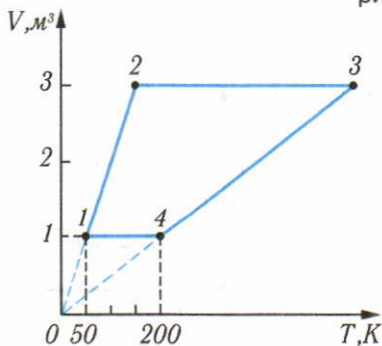


рис. 2.19

18.2. По графикам изопроцессов в координатных осях $p-V$ (рис. 2.18, а, б, в) постройте графики тех же изопроцессов в координатных осях $p-T$ и $V-T$.

18.3*. По графикам изопроцессов в координатных осях $V-T$ (рис. 2.19) постройте графики тех же изопроцессов в координатных осях $p-V$ и $p-T$.

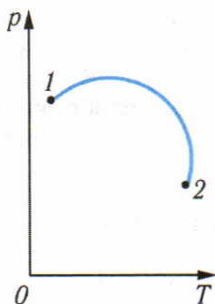


рис. 2.20

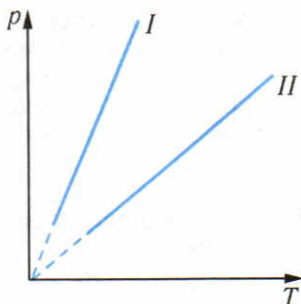


рис. 2.21

18.4*. На рисунке 2.20 представлен график зависимости давления газа от температуры. В состоянии 1 или в состоянии 2 газ занимает больший объем? Ответ обоснуйте.

18.5*. На рисунке 2.21 представлены два графика изменения состояния одного и того же идеального газа. Какой график соответствует большему количеству вещества? Объем газа одинаков. Ответ обоснуйте.

§ 19 Реальные газы

Экспериментальные исследования свойств газов при высоких давлениях и низких температурах, выполненные еще в конце прошлого века, убедительно показали, что уравнение состояния идеального газа дает хорошее согласие с экспериментом для каждого исследуемого газа лишь при температуре выше некоторого значения, вполне определенного для каждого вещества, и при не очень высоких давлениях. Расхождение результатов теории и практики в области низких температур и высоких давлений газов свидетельствует о непригодности при этих условиях упрощенной модели строения газов, в которой не учитываются размеры молекул и силы взаимного притяжения.

Уравнение Ван-дер-Ваальса. В 1873 г. голландский физик И. Ван-дер-Ваальс показал, что согласие результатов теории и эксперимента при установлении зависимости давления газов от объема и температуры оказывается значительно лучшим, если учесть, что молекулы не только отталкиваются при соударениях, но еще и притягиваются друг к другу сравнительно слабыми силами на расстояниях, сравнимых с размерами молекул.

С учетом сил взаимного притяжения молекул для одного моля газа было получено уравнение:

$$p + \frac{a}{V^2} = \frac{RT}{V}. \quad (19.1)$$

Это первая поправка, вводимая в уравнение Ван-дер-Ваальса.

Вторая поправка должна учесть тот факт, что при любых,

даже сколь угодно больших давлениях объем газа не может стать равным нулю. В модели Ван-дер-Ваальса молекулы принимают за твердые шарики диаметром d . В этом случае оказывается, что молекулы реального газа свободно перемещаются не в объеме сосуда V , а в уменьшенном объеме:

$$V' = V - b. \quad (19.2)$$

Здесь b — так называемый «запрещенный объем». Тогда получим

$$p + \frac{a}{V^2} = \frac{RT}{V-b}, \text{ или } \left(p + \frac{a}{V^2}\right)(V-b) = RT. \quad (19.3)$$

Это и есть *уравнение Ван-дер-Ваальса* для одного моля реального газа.

Хотя уравнение Ван-дер-Ваальса дает лучшее согласие теории с результатами эксперимента, все же точность расчетов, выполненных на его основе, обычно недостаточна для решения практических задач на уровне требований современной техники. Поэтому на практике приходится использовать уравнения состояния реального газа еще более сложного вида. Уравнение же Ван-дер-Ваальса интересно тем, что дает качественное объяснение основных отличий в поведении реального газа от идеального.

Средняя длина свободного пробега. В некоторых задачах появляется необходимость учета конечных размеров молекул. Молекулы газа испытывают столкновения не только со стенками сосуда, но и друг с другом. Поэтому одним из параметров газа является средняя длина свободного пробега его молекул.

Длиной свободного пробега молекулы газа называют длину пути, пройденного ею между двумя последовательными столкновениями (рис. 2.22). Так как молекулы газа распре-

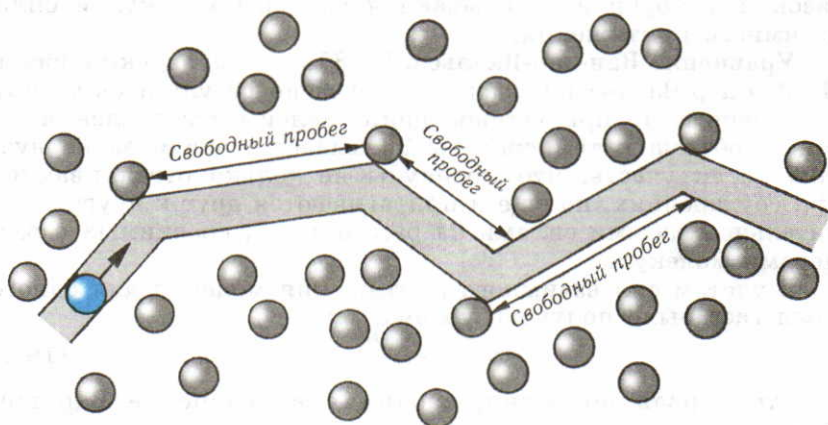


рис. 2.22

делены в пространстве беспорядочно, движутся во всевозможных направлениях и с различными скоростями, то длина пути между каждыми двумя последовательными столкновениями молекулы оказывается величиной непостоянной. Однако можно найти *среднее значение длины свободного пробега* молекулы газа для большого числа столкновений и пользоваться этим параметром для характеристики газа.

Среднюю длину свободного пробега можно вычислить теоретически, если известны радиус молекул и их концентрация. При расчетах будем считать, что молекулы газа при столкновении ведут себя как упругие шары, отталкивающиеся только при соприкосновении, когда расстояние между их центрами равно удвоенному радиусу: $d = 2r$. Силы взаимного притяжения молекул во внимание принимать не будем.

Для определения средней длины свободного пробега вычислим сначала число столкновений, которое испытывает молекула за 1 с. Если средняя скорость движения молекулы равна $\bar{v}$, то для определения числа соударений Z , испытываемых ею за 1 с, необходимо найти число молекул, центры которых попадают внутрь цилиндра радиусом $d = 2r$ и длиной $l = \bar{v}\Delta t$ ($\Delta t = 1$ с). Очевидно, что число соударений можно определить как произведение объема цилиндра на концентрацию молекул газа:

$$Z = V_{\text{ц}} n = S l n = \pi (2r)^2 \bar{v} n \Delta t = 4\pi r^2 n \bar{v} \Delta t. \quad (19.4)$$

Разделив путь l , пройденный молекулой за 1 с, на число столкновений Z , испытанных ею за это же время, получим среднюю длину свободного пробега λ :

$$\lambda = \frac{l}{Z} = \frac{\bar{v}\Delta t}{4\pi r^2 \bar{v} n \Delta t} = \frac{1}{4\pi r^2 n} = \frac{1}{\sigma n}, \quad (19.5)$$

где $\sigma = 4\pi r^2$ — эффективное сечение.

Диффузия в газах. Если молекула газа при каждом столкновении изменяет направление движения совершенно случайным образом, то среднее расстояние s , на которое молекула удалится от первоначального своего местонахождения за время t , можно определить, если известны средняя длина ее свободного пробега λ и средняя частота столкновений Z .

Кажется правдоподобным предположение, что результатом хаотического блуждания каждой молекулы должно быть «топтание» ее вблизи одного и того же места, сколько бы времени ни прошло.

Однако простые наблюдения за процессом диффузии заставляют отказаться от этого предположения. В комнате, где только что выкрашены полы и стены, запах краски ощущается в любой точке пространства комнаты и даже за ее пределами, а не только вблизи окрашенных поверхностей. Значит, молекулы растворителя, испарившись с окрашенной по-

верхности, не «толкнутся» вблизи места своего освобождения, а удаляются от него на большие расстояния.

Как показывает анализ хаотического движения молекул, модуль перемещения $\vec{s}$ молекулы за время t пропорционален корню квадратному из числа столкновений N , испытанных ею за это время, и средней длине свободного пробега λ . Отсюда связь между модулем перемещения s , временем t и средней скоростью $\bar{v}$ молекул определяется выражением

$$s = \sqrt{N} \lambda = \sqrt{\frac{\bar{v} t}{\lambda}} \lambda = \sqrt{\bar{v} \lambda} t. \quad (19.6)$$

Полученное соотношение позволяет определять среднюю длину свободного пробега газовых молекул λ за известное время t по экспериментальному значению модуля перемещения $\vec{s}$ и вычисленной средней скорости их движения $\bar{v}$.

Интересно сравнить модуль перемещения молекулы газа за счет диффузии с расстоянием, которое могла бы пройти молекула за 1 с, если бы не было соударений с другими молекулами.

Выполним расчет для воздуха при нормальном атмосферном давлении и температуре 20 °С. Средняя скорость теплового движения молекул при этих условиях составляет примерно 500 м/с, средняя длина свободного пробега их около $6 \cdot 10^{-8}$ м, тогда среднее значение s модуля перемещения молекулы за 1 с равно:

$$s \approx \sqrt{500 \text{ м/с} \cdot 1 \text{ с} \cdot 6 \cdot 10^{-8} \text{ м}} = 5,5 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 5,5 \text{ мм}.$$

При нормальных условиях молекула могла бы пробежать за 1 с путь около 0,5 км, но из-за хаотических изменений направления движения в результате большого числа столкновений с другими молекулами смещается от своего первоначального положения в среднем всего на 5 мм!

Здесь следует обратить внимание на то, что процесс диффузии газовых молекул нельзя охарактеризовать понятием средней скорости диффузии, как это хотелось бы сделать. Объясняется это тем, что модуль среднего перемещения молекулы пропорционален времени не в первой степени, а в степени 1/2. Следовательно, если определить скорость диффузии как s/t , то эта величина окажется непостоянной и будет убывать с увеличением промежутка времени.

■ Вопросы

1. Каков смысл первой и второй поправок в уравнении Ван-дер-Ваальса?
2. Является ли изотерма ван-дер-ваальсового газа гиперболой? 3. От чего зависит средняя длина свободного пробега молекул газа? 4. Как зависит модуль перемещения молекулы при хаотическом тепловом движении от времени? 5. Сравните выражения для модуля перемещения броуновской частицы (14.1) и перемещения молекулы при диффузии (19.6). Какие выводы отсюда можно сделать?

■ Задачи для самостоятельного решения

19.1. Как изменится частота столкновений молекулы газа с другими молекулами при увеличении давления газа в 2 раза? Температура постоянна.

19.2. В межзвездном пространстве имеется газообразный атомарный водород. Его концентрация составляет примерно 1 атом/см³, температура 125 К. Вычислите давление межзвездного газа, длину свободного пробега и средний промежуток времени между двумя столкновениями молекул. Радиус атома водорода равен $5 \cdot 10^{-11}$ м.

19.3. Оцените, каким должно быть давление азота в сосуде, чтобы при температуре 0 °С длина свободного пробега его молекул была равна 1 м. Эффективное сечение молекулы азота принять равным $4,3 \cdot 10^{-19}$ м².

§ 20 Агрегатные состояния и фазовые переходы

Все вещества (за малым исключением) могут находиться в трех агрегатных состояниях — газообразном, жидком и твердом (кристаллическом). Переход вещества из одного состояния в другое зависит от условий, в которых оно находится, — от давления и температуры.

В газах и жидкостях структурные элементы, из которых состоит то или иное вещество, — атомы, молекулы или ионы — расположены беспорядочно. Иначе обстоит дело с кристаллами, где частицы вещества расположены упорядоченно, образуя кристаллическую решетку. Таких решеток у вещества может быть несколько, в результате чего возможно несколько различных модификаций кристалла с разными свойствами. Например, углерод образует две кристаллические модификации — графит и алмаз.

Исходя из этого, кроме понятия агрегатного состояния, вводится более широкое понятие фазы. *Фаза* — это равновесное состояние вещества, отличающееся по своим физическим свойствам от других состояний того же вещества. У вещества возможны газообразная и жидкая фазы и одна или несколько кристаллических фаз. Переход вещества из одной фазы в другую называется *фазовым переходом*. При таких переходах меняются механические, тепловые, электрические и магнитные свойства вещества.

Пары и «постоянные газы». Примерно до середины XIX в. вещества в газообразном состоянии разделялись на пары и «постоянные газы». «Постоянными газами» называли аммиак, кислород, азот, водород, хлор, так как их не удавалось перевести в жидкое состояние путем повышения давления.

Догадку об отсутствии принципиального различия между парами и «постоянными газами» высказывал еще в конце XVII в. А. Лавуазье. Он считал, что при достаточно низкой температуре в жидкость превратится и атмосферный воздух.

Первым из «постоянных газов» был сжижен аммиак при повышении давления до $7 \cdot 10^5$ Па. В 1823 г. М. Фарадею удалось превратить в жидкость хлор путем охлаждения его при повышенном давлении. В 1877 г. французский инженер Кальете и швейцарский физик Р. Пикте независимо друг от друга добились сжижения кислорода при повышении давления примерно до $3 \cdot 10^7$ Па и охлаждении до температуры ниже -140°C . В том же году был сжижен азот. В 1898 г. английский физик Дж. Дьюар получил жидкий водород, а в 1908 г. в Голландии Г. Камерлинг-Оннес перевел в жидкое состояние гелий — последний газ, который до него никому не удавалось превратить в жидкость.

Таким образом, было установлено, что из газообразного состояния в жидкое можно перевести любое вещество. Однако каждое вещество может испытать такое превращение лишь при температурах ниже определенной, так называемой *критической температуры* T_k . При температуре выше критической вещество не превращается в жидкость или твердое тело ни при каких давлениях. Очевидно, что при критической температуре средняя кинетическая энергия теплового движения молекул вещества примерно равна модулю потенциальной энергии их связи в жидкости или твердом теле. Так как силы притяжения, действующие между молекулами разных веществ, различны, неодинакова и потенциальная энергия их связи, отсюда различными оказываются критические температуры для разных веществ.

Сжижение газов. Рассмотрим основные принципы, используемые в машинах для сжижения газов. Первое условие, которое необходимо выполнить для превращения газа в жидкость, — это охлаждение его до температуры ниже критической. При температуре ниже критической любой газ может быть переведен в жидкое состояние путем повышения давления, поэтому сжижение газов, имеющих высокую критическую температуру, не представляет принципиальной трудности. Более сложной задачей является сжижение газов, критическая температура которых близка к абсолютному нулю. Такими газами являются кислород, азот, водород, гелий, критические температуры которых равны соответственно 154,4, 126,4, 33,3 и 5,3 К. Такие низкие температуры не встречаются на Земле в естественных условиях, поэтому проблема сжижения этих газов оказывается тесно связанной с проблемой получения низких температур.

Особенности жидкого состояния вещества. Способность любого вещества превращаться из газа в жидкость доказывает, что между частицами вещества (атомами, молекулами) действуют не только силы отталкивания, но и притяжения.

Частицы вещества в жидкости или в твердом теле плотно упакованы, т. е. находятся друг от друга в среднем на та-

ких расстояниях, когда сила взаимодействия между ними равна нулю, т. е. энергия взаимодействия минимальна. Сменяясь периодически от положений равновесия, частицы совершают тепловые колебания. В жидкости упорядоченное расположение молекул сохраняется лишь среди ближайших соседей, т. е. на расстояниях порядка нескольких молекулярных диаметров. Такое расположение частиц вещества называется *ближним порядком*. Молекулы жидкости, совершая тепловые колебания около положений равновесия, при столкновениях друг с другом могут приобрести энергию, достаточную для того, чтобы «перекочевать» в новое положение равновесия. В результате этого ближний порядок постоянно разрушается тепловым движением и вновь создается силами межмолекулярного взаимодействия.

Существование ближнего порядка в расположении молекул жидкости и возможность их сравнительно свободного перемещения друг относительно друга обуславливают ряд свойств жидкостей. Так, объем жидкости мало зависит от давления. Малая сжимаемость является свойством, общим для жидких и твердых тел и отличающим их от газов, способных занимать любой предоставленный объем.

Возможность свободного перемещения молекул друг относительно друга обуславливает свойство текучести жидкости. Вследствие этого форма жидкого тела определяется формой сосуда, в котором находится жидкость, действием внешних сил (в частности, силы тяжести) и сил поверхностного натяжения. Большая свобода движения молекул в жидкости приводит к большей скорости диффузии в жидкостях, чем в твердых телах, обеспечивает возможность растворения твердых веществ в жидкостях.

Твердое тело. Из газообразного и жидкого состояний любое вещество может перейти в твердое состояние. Твердое тело отличается от жидкости тем, что при тепловых колебаниях около положений равновесия атомы и молекулы длительное время не могут изменить своего положения среди других атомов. Это приводит к возможности установления *дальнего порядка* в расположении атомов, т. е. строгой периодичности в расположении атомов на протяжении тысяч межатомных расстояний. Упорядоченная структура в реальном кристалле нарушается из-за наличия дефектов.

Дефекты в структуре кристаллической решетки облегчают также переходы атомов или молекул в кристалле с одного места на другое, но происходят такие переходы редко. Среднее время «оседлой жизни» молекул исчисляется сутками и годами. Поэтому диффузия в кристаллах протекает медленно.

Диаграмма состояний вещества. На рисунке 2.23 изображены диаграммы трех фазовых состояний вещества. Равно-

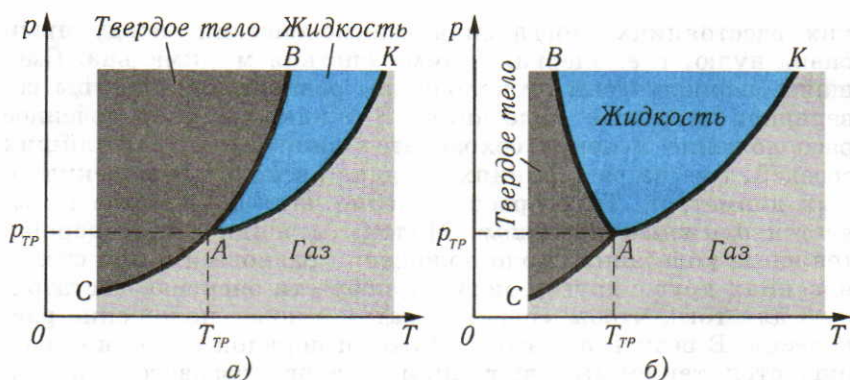


рис. 2.23

весному состоянию между жидкостью и ее паром соответствует кривая испарения AK .

Равновесие между твердым и жидким состояниями вещества характеризует кривая плавления AB . При давлениях и температурах, соответствующих точкам этой кривой, твердое тело и расплав, приведенные в соприкосновение, находятся в динамическом равновесии. Число молекул, переходящих в единицу времени из жидкости в твердое тело, равно числу молекул, переходящих границу раздела между ними в противоположном направлении.

Кривая плавления идет почти вертикально, поскольку температура плавления слабо зависит от давления (на рис. 2.23, а она немного отклонена вправо). Этим иллюстрируется повышение температуры плавления с увеличением давления, наблюдаемое у большинства веществ. Для вещества, обладающего в твердом состоянии меньшей плотностью, чем в жидком (лед, висмут, серый чугун), увеличение давления способствует плавлению. Для таких веществ кривая плавления отклонена влево от вертикали (рис. 2.23, б).

Кривая CA на диаграмме состояний вещества отвечает значениям давления и температуры, при которых устанавливается равновесие между процессами испарения молекул (атомов) твердого тела и конденсации их на поверхность твердого тела. Процесс испарения твердых тел называется *сублимацией*. Конечно, сублимации сопутствует и обратный процесс — кристаллизация из пара. При определенных сочетаниях температуры и давления система «кристалл — пар» находится в динамическом равновесии. С уменьшением температуры кристалла уменьшается и давление его насыщенного пара (см. кривую сублимации CA).

Тройная точка. Кривые плавления и парообразования пересекаются в точке A . Эту точку называют *тройной точкой*, так как если при давлении $p_{тр}$ и температуре $T_{тр}$ некоторые

части вещества в твердом, жидком и газообразном состояниях находятся в контакте, то без подведения или отвода тепла количество вещества, находящегося в каждом из трех состояний, не изменяется.

Из диаграммы состояний вещества видно, что переход вещества при нагревании из твердого состояния в газообразное может совершиться, минуя жидкое состояние. Переход кристалл — жидкость — газ при нормальном атмосферном давлении происходит лишь у тех веществ, у которых давление в тройной точке ниже этого давления. Те же вещества, у которых давление в тройной точке превышает атмосферное, в результате нагревания при атмосферном давлении не плавятся, а переходят в газообразное состояние (сублимируют).

Например, при атмосферном давлении твердая углекислота при нагревании не плавится, а сублимирует. Это объясняется тем, что тройной точке соединения CO_2 соответствует давление, примерно в пять раз большее нормального атмосферного давления.

Поскольку тройной точке соответствует вполне определенная температура, она может служить опорной (основной) точкой термометрической шкалы. Оказывается, что температура тройной точки воды равна 273,16 К (т. е. 0,01 °С). Это позволило ввести в Международной системе единиц следующее определение единицы термодинамической (абсолютной) температуры (1 К): кельвин равен $1/273,16$ части термодинамической температуры тройной точки воды.

■ Вопросы

1. Каковы особенности жидкого состояния вещества? 2. Что такое «ближний порядок» в расположении молекул? 3. Чем объясняется свойство текучести жидкости? 4. Что такое «дальний порядок»? 5. Почему мала сжимаемость твердых тел и жидкостей? 6. Может ли вещество переходить из газообразного состояния в твердое, минуя фазу жидкого состояния? 7. Может ли твердое тело превратиться в газ без плавления? 8. Что такое «тройная точка»? 9. Как определяется единица температуры — кельвин — в Международной системе единиц?

§ 21 Испарение и конденсация

Испарение. В жидкости или твердом теле при любой температуре существует некоторое количество молекул (атомов), кинетическая энергия которых превышает модуль потенциальной энергии их связи с остальными частицами вещества. Испарение — это процесс, при котором с поверхности жидкости или твердого тела вылетают частицы (молекулы, атомы), кинетическая энергия которых превышает потенциальную энергию их связи с остальными частицами вещества.

При испарении с поверхности жидкости или твердого тела вылетают наиболее быстрые частицы, обладающие макси-

мальной кинетической энергией. В результате происходит уменьшение средней кинетической энергии оставшихся частиц. Поэтому процесс испарения сопровождается охлаждением жидкости или твердого тела, если только при этом нет подвода тепла из окружающей среды.

Насыщенный и ненасыщенный пар. Процесс испарения жидкости или твердого тела в закрытом сосуде или помещении при неизменной температуре сопровождается постепенным увеличением концентрации молекул испаряющегося вещества в газообразном состоянии. Через некоторое время после начала процесса испарения концентрация вещества в газообразном состоянии достигает такого значения, при котором число молекул, возвращающихся в единицу времени, становится равным числу молекул, покидающих поверхность жидкости за то же время. Устанавливается динамическое равновесие между процессами испарения и конденсации вещества.

Вещество в газообразном состоянии, находящееся в динамическом равновесии с жидкостью или твердым телом, называется *насыщенным паром*. Пар, давление которого ниже давления насыщенного пара при данной температуре, называется *ненасыщенным* (или *перегретым*).

При уменьшении объема, занимаемого насыщенным паром, концентрация его молекул увеличивается и пар становится пересыщенным. Равновесие между процессами испарения и конденсации пара нарушается, скорость конденсации превышает скорость испарения, в результате чего часть вещества из газообразного состояния превращается в жидкое и пар вновь становится насыщенным. Пар из насыщенного может стать пересыщенным не только при повышении концентрации молекул, но и при понижении температуры.

Интенсивность процесса испарения увеличивается с возрастанием температуры жидкости (или испаряющегося твердого тела). Поэтому установление динамического равновесия между процессами испарения и конденсации при повышении температуры происходит при более высоких концентрациях молекул газа.

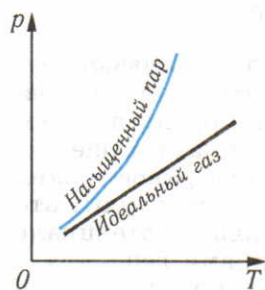


рис. 2.24

Давление идеального газа при постоянной концентрации молекул возрастает прямо пропорционально абсолютной температуре. Так как в насыщенном паре при возрастании температуры концентрация молекул увеличивается, а их средняя кинетическая энергия также возрастает, то давление насыщенного пара с повышением температуры возрастает быстрее, чем давление идеального газа с постоянной концентрацией молекул (рис. 2.24).

Кипение. Зависимость температуры кипения от давления. Испарение может происходить не только с поверхности жидкости, но и в пузырьки воздуха, который обычно растворен в жидкости. Объем этих пузырьков, заполненных насыщенным паром, невелик, но с ростом температуры резко возрастает. Эти пузырьки всплывают на поверхность жидкости и лопаются, выбрасывая пар в атмосферу, если давление насыщенного пара равно внешнему давлению или превышает его. Процесс испарения, идущий по всему объему жидкости, называется *кипением*. Давление насыщенного водяного пара при кипении равно внешнему давлению на жидкость. При нормальном давлении кипение воды происходит при $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. При температуре, например $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, давление насыщенного пара примерно в два раза меньше нормального атмосферного давления. Поэтому вода при этой температуре должна закипеть, если давление над ней уменьшить до половины нормального атмосферного давления. Проверить это можно на следующем опыте. Налейте в небольшой стеклянный стакан воду, нагретую до $80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Вода при нормальном давлении не кипит. Поставим стакан под стеклянный колпак на тарелку вакуумного насоса и будем откачивать воздух из-под колпака. Вскоре вода закипит (рис. 2.25), хотя температура ее остается прежней.

Итак, теория и опыт показывают, что температура кипения зависит от внешнего давления. При понижении внешнего давления температура кипения жидкости понижается, при повышении давления температура кипения повышается.

Изотерма пара. При температурах выше критической свойства пара достаточно хорошо описываются уравнением Ван-дер-Ваальса. Изотерма пара при этих температурах мало отличается от гиперболы. По мере понижения температуры изотерма пара становится все более похожей на график изо-

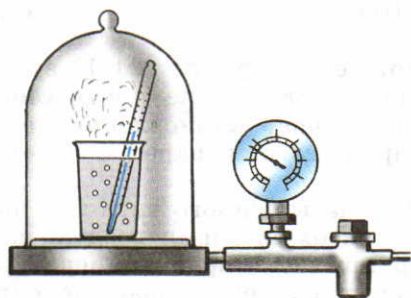


рис. 2.25

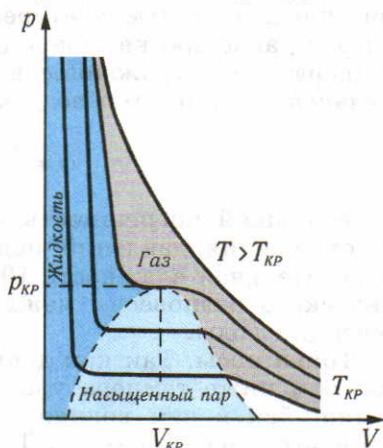


рис. 2.26

термы ван-дер-ваальсова газа. График изотермы при критической температуре обозначен на рисунке 2.26 символом $T_{кр}$; его форма существенно отличается от гиперболы.

Штриховая кривая разделяет три фазы. Слева сверху область соответствует жидкой фазе, справа от кривой и внизу — область ненасыщенного пара (газа), под штриховой кривой лежит область насыщенного пара над жидкостью (двухфазная среда).

Если изотермически сжимать ненасыщенный пар при температуре ниже критической, то концентрация молекул возрастет и соответственно давление будет возрастать вплоть до давления насыщенного пара. При дальнейшем уменьшении объема на дне сосуда образуется жидкость и установится динамическое равновесие между насыщенным паром и жидкостью. Давление насыщенного пара остается неизменным, а с уменьшением объема все большая часть пара переходит в жидкость.

Горизонтальный участок на изотерме пара не связан с особыми свойствами насыщенного пара, а обусловлен процессом превращения части пара в жидкость. Уравнение Клапейрона — Менделеева (17.5) или (17.6) здесь с достаточной степенью точности выполняется, но надо помнить, что масса пара не остается при сжатии постоянной.

Процесс уменьшения объема при дальнейшем сжатии прекращается, когда весь газ в сосуде превращается в жидкость. Резкое возрастание давления при дальнейшем уменьшении объема объясняется малой сжимаемостью жидкости.

Относительная влажность воздуха. В атмосферном воздухе интенсивность испарения воды зависит от того, насколько близко давление паров воды к давлению насыщенных паров при данной температуре. Отношение давления паров воды p к давлению насыщенного водяного пара p_0 при данной температуре, выраженное в процентах, называется *относительной влажностью воздуха*:

$$\varphi = \frac{p}{p_0} = 100\%. \quad (21.1)$$

С небольшой погрешностью можно в формуле (21.1) вместо отношения давлений подставить отношение плотностей. Относительная влажность 100% означает установление динамического равновесия между процессами испарения и конденсации воды.

Точка росы. Так как давление насыщенного пара тем ниже, чем ниже температура, то при охлаждении воздуха находящийся в нем водяной пар при некоторой температуре становится насыщенным. Температура, при которой находящийся в воздухе водяной пар становится насыщенным, называется *точкой росы*.

Гигрометр. Точку росы можно определить с помощью гигрометра. Он представляет собой металлический сосуд, в который наливается легко испаряющаяся жидкость, например эфир. При испарении эфира происходит охлаждение стенок гигрометра, и при достижении точки росы на полированной поверхности появляются капли росы. Температуру гигрометра измеряют термометром. Для ускорения процесса испарения эфира через него с помощью груши продувается воздух (рис. 2.27).

Действие гигрометра другого типа, волосного, основано на свойстве обезжиренного человеческого волоса удлиняться при повышении влажности. В этом приборе натянутый волос соединен со стрелкой прибора, показывающей по шкале относительную влажность воздуха.

Определение относительной влажности. По точке росы можно найти давление водяного пара в воздухе. Оно равно давлению насыщенного пара при температуре, равной точке росы. Отыскав затем в соответствующей таблице значения давления насыщенного водяного пара при температуре воздуха, можно рассчитать относительную влажность воздуха по формуле (21.1).

Относительную влажность воздуха можно также определить с помощью прибора, называемого психрометром (рис. 2.28). Один термометр измеряет температуру воздуха, а другой — температуру ткани, смоченной водой. С поверхности влажной ткани происходит испарение воды, в резуль-

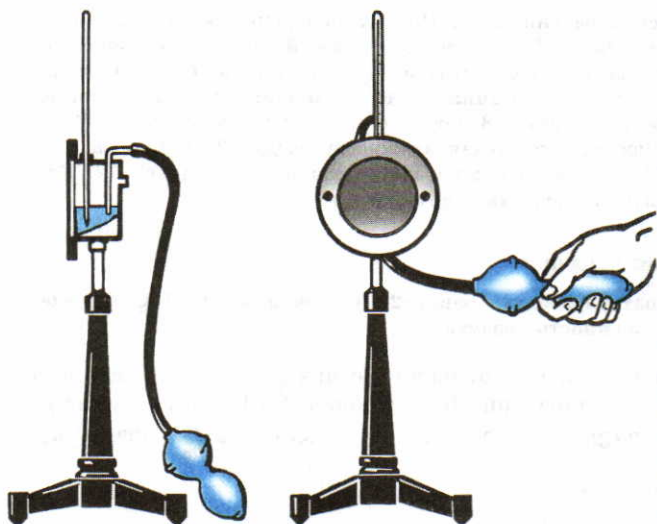


рис. 2.27

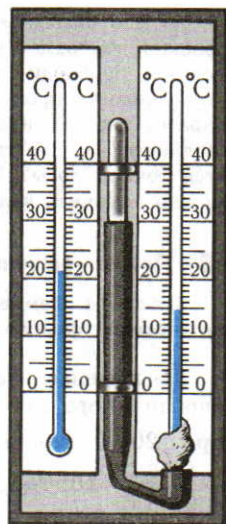


рис. 2.28

тате температура влажной ткани понижается. Скорость испарения воды зависит от температуры и относительной влажности воздуха. Чем меньше паров в воздухе, тем интенсивнее идет процесс испарения и тем ниже температура влажного термометра. С помощью специальной таблицы, называемой психрометрической, по разности показаний сухого и влажного термометров определяют относительную влажность воздуха.

Умение измерять относительную влажность воздуха и регулировать ее бывает необходимо в быту и на производстве. В сухом воздухе происходит очень быстрое испарение влаги с поверхности тела человека, высыхают слизистые оболочки дыхательных путей. При относительной влажности 100% прекращается испарение воды с поверхности тела и тем самым затрудняется возможность терморегуляции человеческого организма. Поэтому для человека вреден как слишком сухой, так и слишком влажный воздух. Наиболее благоприятной для человека является относительная влажность от 40 до 60%.

Определенную влажность воздуха необходимо поддерживать на многих производствах (ткацком, кондитерском и др.) для обеспечения нормальных условий производственного процесса, а также в библиотеках, музеях, хранилищах произведений искусства для обеспечения лучшей сохранности книг и различных произведений искусства.

■ Вопросы

1. Что называется испарением? 2. Почему испарение жидкости сопровождается ее охлаждением? 3. Что такое насыщенный пар? 4. При каких условиях происходит испарение жидкости? 5. Что такое кипение? 6. При каких условиях происходит конденсация пара? 7. Чем отличаются изотермы пара от изотерм идеального газа? 8. От чего зависит температура кипения жидкости? 9. Что такое относительная влажность воздуха? 10. Что называется точкой росы? 11. Для чего нужно знать влажность воздуха? 12. Как можно изменить влажность воздуха в помещении?

■ ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Задача. Температура воздуха равна 20 °С, точка росы 10 °С. Определите относительную влажность воздуха.

Решение. Из таблицы в справочнике находим, что давление p насыщенного водяного пара при 10 °С равно 1226 Па, а давление p_0 при 20 °С равно 2333 Па. Отсюда получаем $\varphi = \frac{p}{p_0} 100\%$; $\varphi = \frac{1226 \text{ Па}}{2333 \text{ Па}} 100\% = 52,6\%$.

■ Задачи для самостоятельного решения

21.1. В кастрюле-скороварке объемом 3 дм^3 находится $0,5 \text{ кг}$ воды при температуре 100°C . Какая доля воды находится в газообразном состоянии под закрытой крышкой кастрюли?

21.2. Вычислите массу насыщенного водяного пара в комнате объемом 200 м^3 при температуре 25°C .

21.3. В воздухе насыщенный водяной пар содержится при 30°C . Определите массу воды, выпавшей в виде росы из 1 м^3 воздуха при его охлаждении до 15°C .

21.4. В воздухе объемом 60 м^3 был насыщенный водяной пар при температуре 15°C . Определите массу воды, которая может испариться в комнате при повышении температуры до 25°C .

21.5. Давление водяного пара в воздухе при температуре 20°C равно $2,33 \text{ кПа}$. Чему равна относительная влажность воздуха?

21.6. Температура воздуха 24°C , точка росы — 8°C . Определите относительную влажность воздуха.

21.7. Относительная влажность воздуха при температуре 25°C равна 60% . До какой температуры следует охладить воздух, чтобы началось выпадение росы?

21.8. Относительная влажность воздуха при температуре 20°C равна 80% . Какой будет относительная влажность воздуха при температуре 30°C , если давление водяных паров в нем не изменится?

§ 22 Свойства поверхности жидкостей

Поверхностная энергия. Рассмотрим явления, связанные с существованием у жидкости свободной поверхности, — так называемые *поверхностные явления*.

Выдувать мыльные пузыри — любимое занятие детей. Но, оказывается, из этого занятия можно извлечь много ценных сведений. Известно, что мыльный пузырь имеет почти правильную сферическую форму. Если прекращают выдувать пузырь, то он самопроизвольно сокращается и его поверхность уменьшается.

Все, вероятно, любовались маленькими капельками росы, которые на листьях растений принимают форму почти правильных шариков. Такую же форму имеют капли воды на парафине. Если эти капли привести в соприкосновение, то они сольются в одну большую каплю, форма которой также будет близка к шаровой.

Эти явления кажутся удивительными! Ведь мы привыкли видеть, что жидкость принимает форму сосуда, в котором она находится, и собственной формы не имеет. Оказывается, это не всегда верно.

Из геометрии известно, что шар имеет наименьшую площадь поверхности из всех тел равного объема. Легко рассчитать, что если два одинаковых шарика сливаются в один, то площадь его поверхности будет меньше суммы площадей

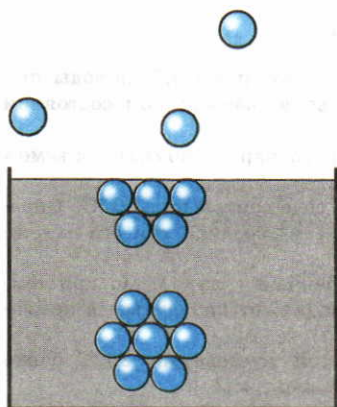


рис. 2.29

Все дело в том, что молекулы на поверхности и в глубине жидкости находятся в разных условиях. Молекула внутри жидкости взаимодействует с соседними молекулами, окружающими ее со всех сторон (рис. 2.29). Над поверхностью жидкости находится пар, плотность которого во много раз меньше, и взаимодействием его с молекулами жидкости можно пренебречь. Молекулы, находящиеся на поверхности, взаимодействуют практически только с теми молекулами, которые находятся внутри жидкости. Казалось бы, что молекулы, находящиеся на поверхности, должны втянуться внутрь жидкости. Но все молекулы не могут уйти внутрь.

На поверхности остается такое число молекул, при котором ее площадь оказывается минимальной для данного объема жидкости. Так, капли жидкости принимают форму, близкую к шаровой, при которой поверхность минимальна.

При увеличении поверхности жидкости за счет внешнего воздействия часть молекул из внутренних областей жидкости переходит на ее поверхность.

При таком переходе совершается работа против сил притяжения, действующих на молекулы, переходящие в поверхностный слой.

Поэтому молекулы на поверхности жидкости обладают большей энергией, чем те же молекулы внутри жидкости.

Чем больше поверхность жидкости, тем большее число молекул обладает избыточной потенциальной энергией. Избыточную потенциальную энергию, которой обладают молекулы на поверхности жидкости, называют *поверхностной энергией*.

Отношение поверхностной энергии к площади поверхности называется *удельной поверхностной энергией*.

поверхностей обоих шариков. Выходит, что в описанных явлениях мы наблюдали самопроизвольное сокращение поверхности жидкости: жидкость принимала форму, при которой площадь ее поверхности оказывалась минимальной.

Положим бритвенное лезвие, слегка покрытое жиром, на поверхность воды. Оно не тонет. Но если погрузить это же лезвие в глубину воды, оно пойдет ко дну. Значит, свойства поверхности жидкости отличаются от свойств остальной ее части.

Как это можно объяснить?

Эту величину обозначают греческой буквой σ (сигма):

$$\sigma = \frac{E_{\text{пов}}}{S}. \quad (22.1)$$

В СИ единицей удельной поверхностной энергии является 1 Дж/м^2 .

Поверхностной энергией обладают как жидкие, так и твердые тела. Ведь особые условия, в которых находятся молекулы на поверхности жидкости, характерны также и для поверхности твердых тел.

Устойчивое равновесие наступает при минимуме поверхностной энергии. Значит, сокращение поверхности жидкости, при котором уменьшается поверхностная энергия, — это самопроизвольный процесс, ведущий к состоянию устойчивого равновесия.

Поверхностная энергия уменьшается, если поверхность жидкости покрывается веществом, поверхностная энергия которого меньше, чем у данной жидкости. Если такое вещество растворить в воде (например, мыло), то его молекулы концентрируются на поверхности воды, покрывая ее плотным слоем. При этом поверхностная энергия системы уменьшается. Так, при малой концентрации мыла в воде (до 5%) на поверхности воды адсорбируется до 95% молекул мыла.

Поверхностное натяжение. Как измерить удельную поверхностную энергию жидкости? Очевидно, это можно сделать, определив работу, необходимую для образования поверхности.

Для вычисления этой работы воспользуемся свойством некоторых жидкостей, например мыльной воды, создавать тонкие пленки. Рассмотрим мыльную пленку, образованную на прямоугольнике с одной подвижной перекладиной длиной d (рис. 2.30, а). Если на эту перекладину не действует сила, поверхность жидкости будет сокращаться и подвижная перекладина притянется к неподвижной (рис. 2.30, б). Площадь поверхности сократится до минимума. Значит, со стороны жидкой пленки вдоль ее поверхности действует сила $\vec{F}_{\text{пов}}$, касательная к поверхности и перпендикулярная участку периметра, ограничивающего поверхность жидкости. Эта сила называется *силой поверхностного натяжения*.

Пленку можно растянуть и удерживать в равновесии (рис. 2.31), если к перекладине приложить внешнюю силу $\vec{F}$, равную по модулю

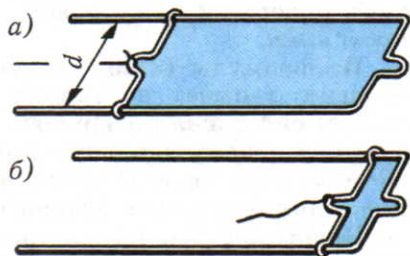


рис. 2.30

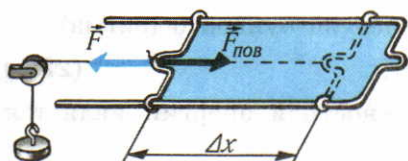


рис. 2.31

силе поверхностного натяжения:

$$\vec{F} = -\vec{F}_{\text{пов}}. \quad (22.2)$$

Если под действием силы $\vec{F}$ подвижная перекладина сместится на Δx , то произведенная работа A будет положительна: $A = F\Delta x$. За счет

этой работы поверхность пленки увеличится на ΔS .

Сила поверхностного натяжения $\vec{F}_{\text{пов}}$ совершает при этом отрицательную работу:

$$A' = -F_{\text{пов}}\Delta x. \quad (22.3)$$

Так как пленка — это тонкий слой жидкости, ограниченный двумя поверхностями, то $\Delta S = \Delta x l$, где $l = 2d$.

Поверхностная энергия при этом увеличится на

$$\Delta E_{\text{пов}} = \sigma \Delta S = \sigma l \Delta x, \quad (22.4)$$

где $\Delta E_{\text{пов}}$ — изменение поверхностной энергии. Так как $A' = -\Delta E_{\text{пов}}$, то, подставив в это выражение вместо A' и $\Delta E_{\text{пов}}$ их значения из формул (22.3) и (22.4), получим

$$-F_{\text{пов}}\Delta x = -\sigma l \Delta x.$$

Отсюда

$$\sigma = \frac{F_{\text{пов}}}{l}. \quad (22.5)$$

Если проводить опыты с рамками, имеющими различную длину подвижной перекладины, то можно обнаружить, что абсолютное значение сил поверхностного натяжения пропорционально длине перекладины, а отношение $\frac{F_{\text{пов}}}{l}$ для пленки из данной жидкости всегда одно и то же. Не зависит оно и от материала перекладины.

Следовательно, отношение модуля силы поверхностного натяжения, действующей на границе поверхности жидкости, к длине этой границы характеризует свойства свободной поверхности самой жидкости. Отношение модуля силы поверхностного натяжения к длине периметра, ограничивающего поверхность жидкости, называется *поверхностным натяжением*.

Из формулы (22.5) следует, что удельная поверхностная энергия σ имеет не только энергетический, но и силовой смысл: она равна поверхностному натяжению данной жидкости. Вот почему удельную поверхностную энергию часто также называют *поверхностным натяжением* и обозначают обе эти величины одной буквой σ .

Поверхностное натяжение может быть выражено в ньютонах на метр, что нисколько не противоречит выражению этой величины в джоулях на квадратный метр.

Действительно,

$$1 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2} = 1 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{м}^2} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{м}}.$$

Мыльные пленки на проволочных каркасах различной формы образуют разнообразные фигуры. У этих фигур общим является то, что при заданном контуре их поверхности имеют наименьшие площади из всех возможных.

Собственная форма жидкости. Если жидкость находится только под действием силы тяжести, как, например, при свободном падении, все ее частицы движутся с одинаковым ускорением, а следовательно, с одинаковой скоростью. Поэтому расстояния между частицами жидкости не меняются и жидкость находится в недеформированном состоянии. Значит, если на жидкость действует одна лишь сила тяжести, то она на форму жидкости не влияет. Действие же молекулярных сил, как известно, приводит к сокращению поверхности, и свободно падающая жидкость принимает форму шара. Такую форму жидкости наблюдали, например, космонавты в орбитальных полетах. Шаровая форма — это и есть собственная форма жидкости, которую она принимает под действием межмолекулярных сил.

■ Вопросы

1. Почему молекулы поверхностного слоя обладают большей потенциальной энергией, чем молекулы внутри жидкости? 2. Что такое поверхностное натяжение? 3. Как можно измерить поверхностное натяжение жидкости? 4. Как связано поверхностное натяжение с избыточной потенциальной энергией молекул на поверхности жидкости? 5. Какую форму принимает жидкость в условиях невесомости?

■ Задачи для самостоятельного решения

22.1. Сферическую каплю ртути радиусом 3 мм разделили на две одинаковые капли. Какую работу пришлось при этом совершить для увеличения энергии поверхностного слоя? $\sigma_{\text{Hg}} = 0,465 \text{ Дж/м}^2$.

22.2. Какая работа совершается при перемещении молекулы воды из глубины на поверхность? Диаметр молекулы воды равен примерно $4 \cdot 10^{-10} \text{ м}$. Найдите отношение этой работы к средней кинетической энергии молекулы при комнатной температуре. $\sigma_{\text{H}_2\text{O}} = 0,073 \text{ Дж/м}^2$.

22.3. Две малые капли воды одинакового радиуса при соприкосновении сливаются в одну. Как изменится площадь поверхности образовавшейся капли по сравнению с первоначальной площадью поверхности обеих капель? Почему происходит слияние капель?

22.4. Капля ртути во время падения имеет форму шара радиусом 5 мм. Падая в кювету, она дробится на 8 примерно одинаковых капель. Вычислите: а) отношение поверхностной энергии капли к ее потенциальной энергии в момент соприкосновения с кюветой; б) отношение поверхностной энергии одной из получившихся при дроблении малых капель к ее потенциальной энергии.

Задание

Налейте в тарелку воду и положите на воду 4 спички так, чтобы они составили квадрат. Возьмите кусочек мыла и коснитесь поверхности воды внутри квадрата из спичек. Объясните наблюдаемое явление. Повторите опыт несколько раз и объясните результаты.

§ 23 Капиллярные явления

Явления смачивания и несмачивания. Расплавленная капелька олова, помещенная на деревянную подставку, принимает форму шара. Но если провести паяльником с каплей олова по чистой меди, то олово растечется по медному листу подобно тому, как вода растекается по поверхности чистого стекла. Для лужения железа (покрытия его оловом) протягивают железный лист через ванну с расплавленным оловом.

Жидкость, которая растекается тонкой пленкой по твердому телу, называют смачивающей данное твердое тело. Жидкость, которая не растекается, а стягивается в каплю, называют не смачивающей это тело. Чем же объясняются явления смачивания и несмачивания?

Рассмотрим каплю жидкости на поверхности твердой пластины. Линия, ограничивающая поверхность капли на пластинке, является границей поверхностей трех тел — жидкости (Ж), твердого тела (Т) и газа (Г) (рис. 2.32, а, б). Поэтому в процессе установления равновесия капли жидкости на границе этих тел на каждый элемент этой границы будут действовать три силы: сила поверхностного натяжения жидкости на границе с газом $\vec{F}_{жг}$, сила поверхностного натяжения жидкости на границе с твердым телом $\vec{F}_{жт}$, сила поверхностного натяжения твердого тела на границе с газом $\vec{F}_{тг}$. Будет ли жидкость растекаться по поверхности твердого тела или, наоборот, соберется в каплю, зависит от соотношения величин $\vec{F}_{жт}$, $\vec{F}_{жг}$ и $\vec{F}_{тг}$. Растекание жидкости по поверхности твердого тела произойдет, если $F_{тг} \geq F_{жт} + F_{жг} \cos \theta$

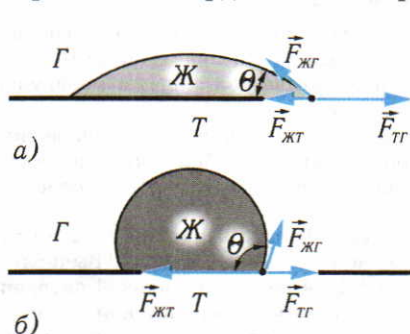


рис. 2.32

(см. рис. 2.32, а), где $F_{жг} \cos \theta$ — проекция силы поверхностного натяжения $\vec{F}_{жг}$ на горизонтальную поверхность. Угол θ , образованный направлением силы поверхностного натяжения $\vec{F}_{жг}$, действующей по касательной к поверхности жидкости, с поверхностью твердого тела, называется *краевым углом*. Он всегда отсчитывается внутрь жидкости.

Из условия равновесия $F_{\text{тг}} = F_{\text{жт}} + F_{\text{жг}} \cos \theta$ следует:

$$\cos \theta = \frac{F_{\text{тг}} - F_{\text{жт}}}{F_{\text{жг}}}. \quad (23.1)$$

Как видно, если поверхностное натяжение на границе жидкость — твердое тело меньше, чем на границе твердое тело — газ (т. е. $F_{\text{жт}} < F_{\text{тг}}$), то $\cos \theta > 0$, краевой угол θ острый и жидкость смачивает твердое тело. Если же $F_{\text{жт}} > F_{\text{тг}}$, то $\cos \theta < 0$ и краевой угол θ тупой, т. е. жидкость не смачивает твердое тело (рис. 2.32, б).

Если же $F_{\text{тг}} - F_{\text{жт}} > F_{\text{жг}}$, то условие равновесия (23.1) не может быть выполнено, ибо косинус не может быть больше единицы. Это означает, что жидкость полностью смачивает твердое тело, отделяя его поверхность от газа.

Явления смачивания и несмачивания широко применяются в технике.

Флотационный процесс. Рассмотрим основанный на явлениях смачивания и несмачивания технологический процесс обогащения руд, называемый флотацией¹.

В горных породах полезные ископаемые часто включены лишь в незначительных количествах в пустую породу. Такую «бедную» породу необходимо «обогатить», т. е. отделить пустую горную породу от полезного ископаемого. Разделение породы, измельченной в мелкий порошок, основано на смачивании водой одной ее части, например пустой породы, и несмачивании другой — полезного минерала.

Во флотационную ванну, содержащую измельченную руду, добавляют небольшое количество специально подобранного вещества (обычно дешевые сорта масла), которое обладает способностью смачивать частицы полезного ископаемого, т. е. обволакивать их тонким слоем, и не смачивать пустую породу. Благодаря этому частицы полезного минерала, покрытые тонкой пленкой масла, не смачиваются водой, а частицы пустой породы водой смачиваются.

Через флотационную ванну продувают воздух. Пузырьки воздуха вытесняют воду с масляного слоя на поверхности частиц полезного минерала, и поэтому эти частицы оказываются прилипшими к воздушным пузырькам (рис. 2.33). При этом если размер частицы достаточно мал, то прилипший к ней пузырек воздуха позволяет частице всплыть на поверхность воды во флотационной ванне, где образуется пена, содержащая концентрат, обогащенный ценным минералом. Частицы пустой породы, смачиваемые

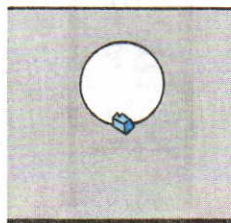


рис. 2.33

¹ От французского слова *flotter* — плавать. Слово «флотация» означает «всплывать».

водой, не прилипают к пузырькам воздуха. Поэтому они остаются на дне ванны.

Моющее действие мыла. Всем хорошо известно, что без мыла бывает трудно отмыть руки. Почему мыльный раствор помогает отмыть загрязнения? Молекулы мыла обладают особым строением: они состоят из «активной» частицы, сильно взаимодействующей с водой, и из углеводородной цепи атомов — «хвоста», которые с водой взаимодействуют слабо.

При отмывании загрязненной поверхности мыльным раствором молекулы мыла концентрируются (адсорбируются) на отмываемой поверхности и оказываются ориентированными активными концами к воде. Поэтому поверхность тела лучше смачивается водой. Вода растекается на поверхности тела, вытесняя с нее частицы грязи.

Мениск. На границе с твердым телом смачивающие и несмачивающие жидкости образуют кривые поверхности — мениски — соответственно с острым или тупым краевым углом (рис. 2.34 и 2.35).

Смачивающая жидкость образует вогнутый, а несмачивающая — выпуклый мениск. Образование мениска у жидкости в узких трубках приводит к некоторым интересным явлениям.

Капиллярные явления. Опустим в воду тонкую стеклянную трубку, называемую *капиллярной*¹. Казалось бы, однородная жидкость и в широком сосуде, и в капиллярной трубке должна установиться на одном уровне. Но опыт показывает, что если один из сосудов капиллярный, то вода, которая смачивает стенки трубки, поднимается в ней на не-

¹ От латинского слова *capillaris* — волосной.

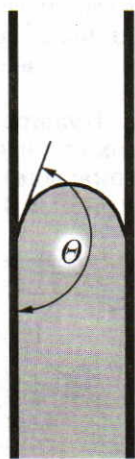


рис. 2.34



рис. 2.35

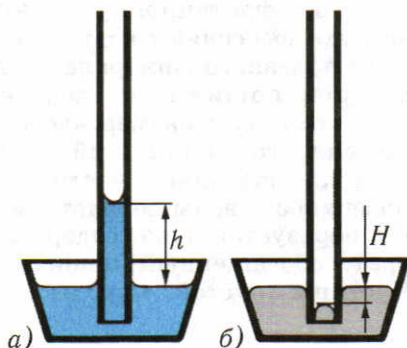


рис. 2.36

которую высоту h над ее уровнем в широком сосуде (рис. 2.36, а). Если аналогичный опыт провести с жидкостью, не смачивающей стенок трубки, то окажется, что уровень жидкости в капилляре будет ниже, чем в широком сосуде (рис. 2.36, б). Эти явления называются *капиллярными*.

Капиллярные явления весьма распространены. Такие вещества, как керамика, бумага, ткань, дерево, кожа, почва, различные строительные материалы и другие пористые тела, имеют в себе множество каналов. Вода и другие смачивающие вещества, придя в соприкосновение с такими телами, впитываются ими, поднимаясь по естественным капиллярам этих тел.

Вода, находящаяся в почве, может проникать в стены здания по капиллярным каналам таких пористых строительных материалов, как кирпич, известняк и др. Для предохранения строений от сырости их фундамент отделяют от кладки стен листами толя. Толь представляет собой лист картона, пропитанный смолой. Этот лист не смачивается водой.

Как объяснить капиллярные явления? Если жидкость полностью смачивает твердое тело ($\theta=0$), то со стороны жидкости на линию ее соприкосновения с твердым телом, длина которой $2\pi r$, действует направленная вниз сила поверхностного натяжения, модуль которой равен

$$F = 2\pi r\sigma,$$

где r — радиус капилляра (рис. 2.37). Со стороны твердого тела на жидкость действует такая же по модулю сила $\vec{F}_1$, направленная вверх. Она и вызывает подъем жидкости в капилляре на такую высоту h , при которой сила тяжести $\vec{F}_T$, действующая на весь поднятый столб жидкости, равна по модулю силе $\vec{F}_1$, а следовательно, и силе поверхностного натяжения $\vec{F}$:

$$F = F_T.$$

Отсюда

$$2\pi r\sigma = mg.$$

Масса поднятого столба жидкости равна $m = V\rho = \pi r^2 h\rho$, где ρ — плотность жидкости, а V — объем поднятого слоя.

Следовательно, $2\pi r\sigma = \pi r^2 h g \rho$, или

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g r}. \quad (23.2)$$

Мы видим, что высота подъема жидкости в капилляре тем больше, чем меньше радиус ка-

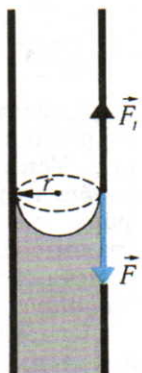


рис. 2.37

пилляра. Кроме того, высота подъема зависит от свойств самой жидкости — ее поверхностного натяжения и плотности.

Жидкость, не смачивающая стенки капилляра, опускается на расстояние H , определяемое по той же формуле.

■ Вопросы

1. Чем объясняются явления смачивания и несмачивания? 2. Что называют краевым углом? 3. Что такое капилляр? 4. В чем заключаются капиллярные явления? 5. Весной землю пахут и боронуют. Объясните, почему это способствует сохранению влаги в почве.

■ Задачи для самостоятельного решения

23.1. На какую высоту может подняться вода в капиллярном канале диаметром 0,04 мм в стебле ржи?

23.2. В стеклянной капиллярной трубке на Земле вода поднимается на 1 см. На какую высоту поднимется вода в той же трубке на Луне, где ускорение свободного падения равно $1,6 \text{ м/с}^2$?

23.3. Глицерин поднялся в капиллярной трубке на 20 мм. Определите поверхностное натяжение глицерина, если диаметр канала трубки 1 мм. Плотность глицерина $1,26 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. На какую высоту в этой трубке поднялась бы вода? Плотность воды равна 10^3 кг/м^3 , а ее поверхностное натяжение — $7,3 \cdot 10^{-2} \text{ Дж/м}^2$.

■ Задания

1. Вычислите максимальный диаметр стального цилиндрика (иглы), который может плавать на поверхности воды при нанесении на его поверхность пленки, не смачиваемой водой. Результат расчета проверьте в опытах со швейными иглами.

2. Опустите в воду конец узкой полоски промокательной бумаги и измерьте, на какую максимальную высоту поднимется вода. По высоте подъема воды оцените диаметр капиллярных каналов волокон бумаги.

§ 24 Кристаллические тела

Анизотропия кристаллов. В природе часто встречаются твердые тела, имеющие формулу правильных многогранников. Такие тела называли кристаллами. Изучение физических свойств кристаллов показало, что геометрически правильная форма не главная их особенность. Основным свойством кристаллических тел является зависимость физических свойств кристалла от направления. Это свойство называется *анизотропией*.

Простейший пример анизотропии кристаллов — неодинаковая их прочность по различным направлениям. Это свойство наглядно проявляется при дроблении кристаллических тел.

Кусок каменной соли неправильной формы при раскалывании дробится на части, ограниченные плоскими поверхностями, пересекающимися под прямыми углами. Очевидно, эти плоскости перпендикулярны особым направлениям в образце каменной соли, по которым его прочность минимальна. Неодинаковая прочность кристалла слюды в различных направлениях обнаруживается по расположению трещин, образующихся при ударе по нему острым предметом.

Исследования кристаллов показали, что тепловые, электрические и оптические свойства также не одинаковы по различным направлениям. Анизотропия физических свойств кристаллов и правильная внешняя форма получили объяснение на основе атомно-молекулярной теории строения вещества.

Плотная упаковка. Английский ученый Р. Гук и голландский ученый Х. Гюйгенс обратили внимание на возможность построения правильных многогранников из плотно укладываемых шаров. Они предположили, что кристаллы построены из одинаковых шарообразных частиц — атомов или молекул. Согласно этой гипотезе, внешняя форма кристаллов является следствием особенностей упаковки частиц, из которых состоит кристалл, — ионов, атомов или молекул. Независимо от них к такому же выводу пришел М. В. Ломоносов. При плотной упаковке шаров в один плоский слой каждый шар оказывается окруженным шестью другими шарами, центры которых образуют правильный шестиугольник. Если укладку второго слоя вести по лункам между шарами первого слоя, то второй слой окажется таким же, как и первый, только смещенным относительно него в пространстве, и т. д.

При укладке шаров ряд за рядом способом плотной упаковки можно получить правильную шестигранную призму (гексагональная упаковка — рис. 2.38) или гранецентрированный куб (рис. 2.39). Кристаллы такой формы очень распространены. Форму шестигранной призмы имеют кристаллы цинка, магния, кадмия, гранецентрированную кубичес-

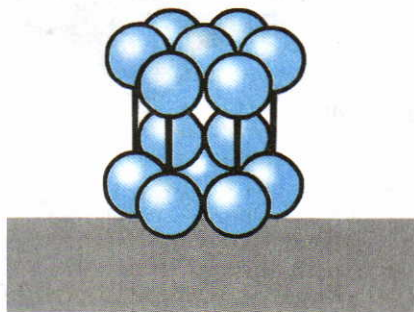


рис. 2.38

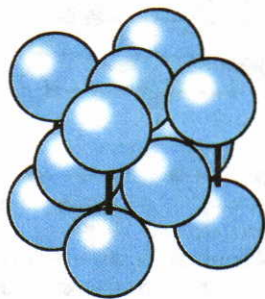


рис. 2.39

кую форму имеют кристаллы меди, алюминия, золота и ряда других металлов.

Но этими двумя формами многообразие мира кристаллов не ограничивается. Существуют формы кристаллов, не соответствующие принципу плотной упаковки равновеликих шаров, на что имеются разные причины. Во-первых, кристалл может быть построен с соблюдением принципа плотной упаковки, но из атомов разных размеров. Во-вторых, отличие упаковки атомов или молекул от плотной может быть вызвано различием сил связей между атомами или молекулами по разным направлениям.

Пространственная решетка. Элементарная ячейка. Для наглядного представления внутренней структуры кристалла применяется способ его изображения с помощью пространственной кристаллической решетки, представляющей расположение центров атомов или молекул данного кристалла в пространстве (рис. 2.40). В каждом кристалле можно указать три направления, вдоль которых кристаллическая решетка может переноситься так, что она переходит сама в себя, т. е. центры атомов (или молекул, ионов) окажутся в аналогичных местах. Такие переносы называются *трансляциями*. При этом можно выделить параллелепипед наименьших размеров, при трансляции которых вместе с частицами, находящимися внутри этого параллелепипеда, можно получить всю кристаллическую решетку. Этот параллелепипед называется *элементарной ячейкой* кристалла (рис. 2.41).

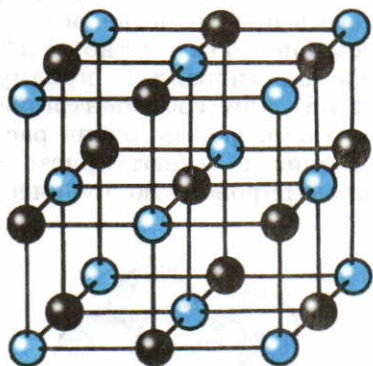


рис. 2.40

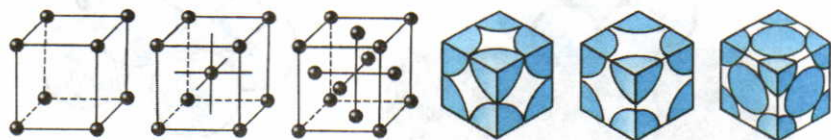
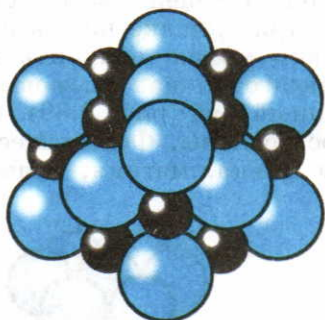


рис. 2.41

Элементарная ячейка, в зависимости от структуры кристалла, может представлять собой куб, прямоугольный или косогольный параллелепипед.

Симметрия кристаллов. Кристаллы могут иметь форму различных призм, основанием которых могут быть правильный треугольник, квадрат, параллелограмм и шестиугольник. В основе классификации кристаллов и объяснения их физических свойств может лежать не только форма элементарной ячейки, но и другие виды симметрии, например поворот вокруг оси. Осью симметрии называют прямую, при повороте вокруг которой на 360° кристалл (или его решетка) несколько раз совмещается сам с собой. Число этих совмещений называют порядком оси. Существуют кристаллические решетки, обладающие осями симметрии второго, третьего, четвертого и шестого порядка. Возможна симметрия кристаллической решетки относительно плоскости симметрии, а также комбинации разных видов симметрии.

Русский ученый Е. С. Федоров установил, что в природе может существовать только 230 различных пространственных групп, охватывающих все возможные кристаллические структуры.

Монокристаллы и поликристаллы. Кристаллические тела могут быть монокристаллами и поликристаллами. *Монокристаллом* называют одиночный кристалл, имеющий макроскопическую упорядоченную кристаллическую решетку. Монокристаллы обычно обладают геометрически правильной внешней формой, но этот признак не является обязательным.

Большинство встречающихся в природе и получаемых в технике твердых тел представляют собой совокупность сросшихся друг с другом хаотически ориентированных маленьких кристаллов — кристаллитов. Такие тела называются *поликристаллическими*. Поликристаллическую структуру чугуна можно, например, обнаружить, если рассматривать с помощью лупы образец на изломе. Наличие кристаллитов в поликристалле можно обнаружить, рассматривая в микроскоп отшлифованную и обработанную кислотой поверхность. В отличие от монокристаллов поликристаллы изотропны, т. е. их свойства одинаковы во всех направлениях.

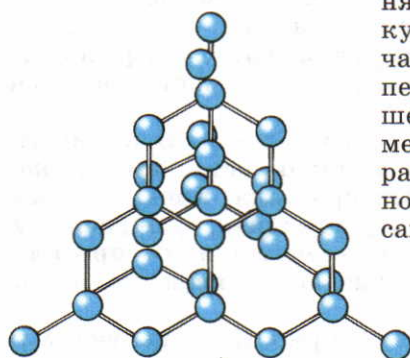
Полиморфизм. Очень многие вещества в кристаллическом состоянии могут существовать в двух или более фазовых разновидностях (модификациях), отличающихся физическими свойствами. Это явление называется *полиморфизмом*. Каждая модификация устойчива в определенном интервале температур и давлений. Из 9 кристаллических фаз воды только одна устойчива при атмосферном давлении. Остальные 8 фазовых состояний льда существуют при высоких давлениях и имеют плотность большую, чем у воды. Одна из них при

давлении $2 \cdot 10^9$ Па имеет температуру плавления $+80^\circ\text{C}$, т. е. существует «горячий лед».

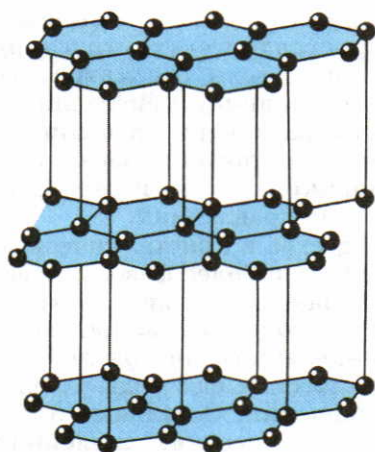
Упорядоченное расположение атомов или молекул в кристалле определяется действием сил межатомного и межмолекулярного взаимодействия. Тепловое движение атомов и молекул нарушает эту упорядоченную структуру. При каждом сочетании давления и температуры реализуется тот тип укладки частиц, который в данных случаях наиболее устойчив и энергетически выгоден.

На рисунке 2.42 изображены кристаллические решетки алмаза (а) и графита (б), на рисунке 2.43 — соответствующая фазовая диаграмма. Различие в упаковке атомов углерода в решетках графита и алмаза определяет существенные различия их физических свойств.

У многих кристаллов неустойчивое в данных условиях фазовое состояние может сохраняться длительное время, поскольку благодаря плотной упаковке частиц и малому числу дефектов перестройка кристаллической решетки весьма затруднена. Например, алмаз при комнатной температуре и нормальном атмосферном давлении не превращается самопроизвольно в более устойчи-



а)



б)

рис. 2.42

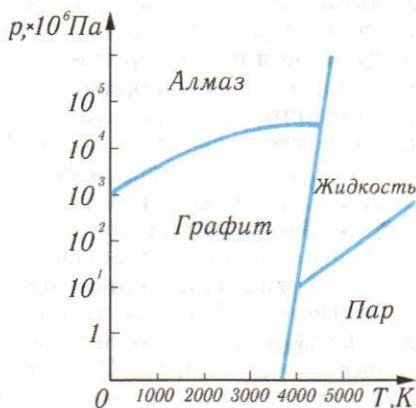


рис. 2.43

вую при этих условиях модификацию — графит. Поэтому алмазы, образованные при высоких температурах и давлениях, можно использовать в обычных условиях.

Разработка способа получения искусственных алмазов из графита имеет большую практическую ценность. Полиморфное превращение графита в алмаз происходит при температуре 2000 °С и давлении 10 ГПа в течение нескольких часов.

Аморфные тела. *Аморфными* называются твердые тела, у которых отсутствует кристаллическая структура. Фактически аморфные тела, у которых упаковка частиц сохраняет ближний порядок, — это переохлажденные жидкости. В природе аморфные тела встречаются редко. Примером аморфных тел могут служить куски затвердевшей смолы — янтарь, изделия из стекла.

Аморфные тела изотропны. Изотропность аморфных тел означает одинаковость физических свойств по всем направлениям.

Экспериментальные методы изучения внутреннего строения кристаллов. Представления о периодической структуре кристаллов и симметрии расположения атомов в них имеют строгое экспериментальное подтверждение. Данные о взаимном расположении атомов в кристаллах и расстояниях между ними получают из опытов, в которых через кристаллы пропускают пучки электронов, ионов, нейтронов, рентгеновское излучение и наблюдают их отражение и рассеяние. Наглядную картину строения кристаллов можно получить с помощью ионного проектора.

По внешнему виду и конструкции ионный проектор напоминает кинескоп телевизора. Стеклообразная колба заполняется водородом или гелием при давлении 0,1 Па.

В сильном электрическом поле вблизи положительно заряженной иглы атомы гелия поляризуются и притягиваются к острию. У поверхности острия с них срывается по одному электрону, и они становятся положительными ионами. Чаще всего ионизация атомов гелия происходит около выступающих участков поверхности острия, вблизи атомов у краев «ступенек» кристаллической решетки (рис. 2.44), где напряженность электрического поля максимальна.

Образовавшиеся положительные ионы движутся прямолинейно к отрицательно заряженному экрану. Соударяясь с экраном, они вызывают его свечение, создавая увеличенное в $(5-10) \cdot 10^6$ раз изображение поверхности острия. Пунктир из светлых точек на рисунке 2.45 — это края «ступенек» кристалла, каждая светлая точка соответствует местоположению атома в кристаллической решетке.

Под действием сильного электрического поля атомы металла как бы «стекают» с кончика острия, образуя сверхтон-

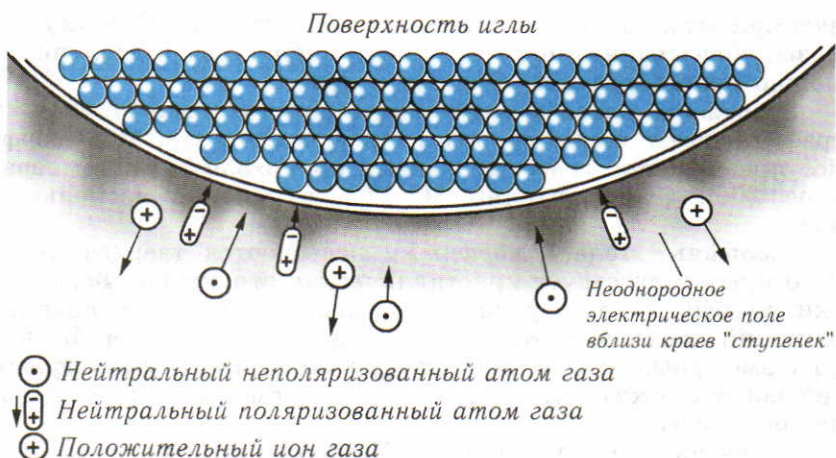


рис. 2.44



рис. 2.45

кую нить диаметром всего в несколько десятков атомов. Этим объясняется большое увеличение ионного проектора.

■ Вопросы

1. Какое свойство наиболее характерно для кристаллических тел? 2. В чем причина анизотропии физических свойств монокристаллов? 3. Что такое элементарная ячейка? 4. Что такое ось симметрии кристалла? 5. Какие опыты доказывают правильность представлений об упорядоченном расположении частиц в кристалле? 6. Чем отличается поликристалл от монокристалла? 7. Чем отличаются аморфные тела от поликристаллов?

■ ЗАДАНИЕ

Приготовьте дома насыщенный раствор поваренной соли. Профильтруйте его и поставьте на несколько дней в теплое место.

Из образовавшихся на дне сосуда кристаллов выберите наиболее крупный и прозрачный. Раствор еще раз профильтруйте и положите в него один выбранный кристалл для дальнейшего выращивания. Полученный через несколько дней кристалл принесите для демонстрации на уроке физики.

§ 25 Механические свойства твердых тел

Атомы и молекулы в твердых телах совершают тепловые колебания около равновесных положений, в которых энергия минимальна. При уменьшении расстояний между атомами возникают силы отталкивания, а при увеличении расстояний между ними — силы притяжения. Это и обуславливает механическую прочность твердых тел, т. е. их способность противодействовать изменению формы и объема. Растяжению тел препятствуют силы межатомного притяжения, а сжатию — силы отталкивания. Этими же силами объясняются упругие свойства твердых тел.

Деформация и напряжение. Деформацию сжатия и растяжения можно характеризовать абсолютным удлинением Δl , равным разности длин образца после растяжения l и до него l_0 :

$$\Delta l = l - l_0. \quad (25.1)$$

Абсолютное удлинение Δl при растяжении положительно, при сжатии отрицательно.

Отношение абсолютного удлинения Δl к первоначальной длине образца l_0 называют относительным удлинением ε :

$$\varepsilon = \frac{|\Delta l|}{l_0}. \quad (25.2)$$

Физическая величина, равная отношению модуля силы упругости $\vec{F}$, возникающей при деформации, к площади сечения S образца, перпендикулярного вектору силы $\vec{F}$, называется *механическим напряжением* σ :

$$\sigma = \frac{F}{S}. \quad (25.3)$$

За единицу механического напряжения в СИ принята единица паскаль (Па): $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$.

Модуль упругости. Деформация называется *упругой*, если после прекращения действия силы размеры и форма тела восстанавливаются. Неупругая деформация называется *пластической*. При малых (упругих) деформациях растяжения и сжатия отношение механического напряжения σ к относительному удлинению ε называется *модулем упругости* E (модулем Юнга). Эта величина одинакова для образцов любой

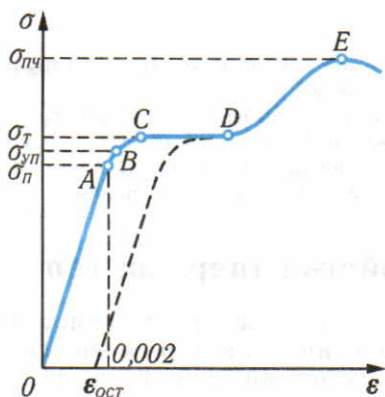


рис. 2.46

формы и размеров, изготовленных из данного материала:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{Fl_0}{|\Delta l|S}. \quad (25.4)$$

Модуль упругости E характеризует механические свойства материала независимо от конструкции изготовленных из него деталей. Поскольку относительное удлинение — отвлеченное число, то модуль упругости выражается в тех же единицах, что и механическое напряжение.

Диаграмма растяжения. Зависимость относительного удлинения образца от приложенного к нему напряжения является одной из важнейших характеристик механических свойств твердых тел. Графическое изображение этой зависимости называется *диаграммой растяжения*. По оси ординат откладывается механическое напряжение σ , приложенное к образцу, а по оси абсцисс — относительное удлинение ε (рис. 2.46).

При небольших напряжениях относительное удлинение прямо пропорционально напряжению, а после снятия нагрузки размеры тела полностью восстанавливаются. Такая деформация, как уже говорилось, называется упругой. Максимальное напряжение $\sigma_{пч}$, при котором деформация еще остается упругой, называется *пределом пропорциональности* (точка A).

Если еще увеличить нагрузку, то деформация становится нелинейной, напряжение перестает быть прямо пропорциональным относительному удлинению. Тем не менее при небольших нелинейных деформациях после снятия нагрузки форма и размеры тела практически восстанавливаются (участок AB диаграммы). Максимальное напряжение, при котором еще не возникают заметные остаточные деформации, называют *пределом упругости* $\sigma_{уп}$. Предел упругости превышает предел пропорциональности лишь на сотые доли процента.

При напряжениях, превышающих предел упругости $\sigma_{уп}$, образец после снятия нагрузки не восстанавливает свою форму или первоначальные размеры. Такие деформации называют *остаточными* или *пластическими*.

В области пластической деформации (участок BC) деформация происходит не пропорционально увеличению напряжения. На горизонтальном участке CD материал «течет» — деформация возрастает при неизменном напряжении. Напряжение σ_t (ордината точки C), при котором материал «течет», называют *пределом текучести*.

Если в области пластических деформаций снять напряжение с тела, то его размеры не будут равны первоначальным. Разгрузка изображается пунктирной кривой на диаграмме рисунка 2.46. У тела сохраняется *остаточная деформация* $\varepsilon_{\text{ост}}$.

Материалы, у которых область текучести CD значительна, могут без разрушения выдерживать большие деформации. Такие материалы называют *пластичными*. Пластичны пластилин, медь, золото. Если же область текучести материала почти отсутствует, он без разрушения может выдержать лишь небольшие деформации. Такие материалы называют *хрупкими*. Примерами хрупких материалов могут служить стекло, кирпич, бетон, чугун.

Материал в процессе деформации может упрочняться. В этом можно убедиться при сгибании толстого медного прута или пластины. Для того чтобы разогнуть образец, требуются заметно бóльшие усилия, чем для его сгибания. Это явление называется *наклепом*.

После точки E кривая идет вниз. Это значит, что дальнейшая деформация вплоть до разрыва происходит при все меньшем напряжении. Наибольшее напряжение $\sigma_{\text{пч}}$, которое способен выдерживать образец без разрушения, называется *пределом прочности*.

Запас прочности. Для того чтобы машины и различные сооружения, здания, мосты были надежными, при их проектировании конструкторы учитывают необходимый запас прочности. Очевидно, что все эти сооружения должны работать в области упругих деформаций.

Коэффициентом безопасности (или *запасом прочности*) называется отношение предела пропорциональности $\sigma_{\text{п}}$ данного материала к максимальному напряжению $\sigma_{\text{д}}$, которое будет испытывать деталь конструкции в работе:

$$n = \frac{\sigma_{\text{п}}}{\sigma_{\text{д}}}.$$

В зависимости от необходимой надежности различных деталей и конструкций коэффициент безопасности выбирают обычно в пределах от 2 до 10.

■ Вопросы

1. Что называется относительным удлинением? 2. Что называется механическим напряжением? 3. Что является единицей СИ механического напряжения? 4. Что такое модуль упругости? Какова единица СИ модуля упругости? 5. Зависимость между какими величинами представляет диаграмма растяжения? 6. Что такое предел пропорциональности (предел упругости)? 7. Что называется пределом текучести? 8. Как возникает остаточная деформация? 9. Что называется пределом прочности? 10. Что такое запас прочности?

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Задача. Какой диаметр должен иметь стальной трос подъемного крана, если максимальная масса поднимаемого груза равна 10 т? Предел прочности стальной проволоки $8,5 \cdot 10^8$ Па, запас прочности должен быть равен 6.

Решение. Предел прочности определяется отношением модуля максимальной силы упругости к площади поперечного сечения:

$$\sigma_n = \frac{F_y}{S}.$$

Так как запас прочности равен 6, трос должен выдержать нагрузку, в 6 раз превышающую ту, которая возникает при подъеме груза массой 10 т. Следовательно, $\sigma_n = \frac{6mg}{\pi D^2} = \frac{24mg}{\pi D^2}$.

Отсюда диаметр троса равен: $D = \sqrt{\frac{24mg}{\pi \sigma_n}}$; $D = \sqrt{\frac{24 \cdot 10^4 \cdot 10}{3,14 \cdot 8,5 \cdot 10^8}} \text{ м} \approx 3 \cdot 10^{-2} \text{ м} = 3 \text{ см}.$

Задачи для самостоятельного решения

25.1. Чему равно абсолютное удлинение стального троса длиной 12 м и площадью поперечного сечения 2 см^2 при подвешивании к нему груза массой 2 т? Модуль упругости стали $2 \cdot 10^{11}$ Па.

25.2. К алюминиевой проволоке длиной 2 м и площадью поперечного сечения 4 мм^2 подвесили груз, под действием которого она удлинилась на 1 мм. Определите силу упругости, возникающую в проволоке. Модуль упругости алюминия $7,1 \cdot 10^{10}$ Па.

25.3. К медной проволоке длиной 1,2 м и площадью поперечного сечения 5 мм^2 подвесили груз массой 10 кг. Определите работу растяжения проволоки. Модуль упругости меди равен $1,18 \cdot 10^{11}$ Па.

25.4. К алюминиевой проволоке длиной 10 м и площадью поперечного сечения 7 мм^2 подвесили груз массой 10 кг. Определите абсолютное и относительное удлинение проволоки. Модуль упругости алюминия $7,1 \cdot 10^{10}$ Па.

25.5. Найдите максимальную высоту здания из кирпича, если предел прочности кирпича на сжатие $1,5 \cdot 10^7$ Па, плотность кирпича $1,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, а необходимый запас прочности равен 6.

25.6. Какой диаметр должен иметь стальной трос подъемного устройства, если максимальная масса поднимаемого груза равна 5 т? Предел прочности троса 10^9 Па, запас прочности должен быть равен 6.

25.7. Масса кабины лифта с пассажирами 500 кг. Кабина подвешена на тросе, изготовленном из стали с пределом прочности на растяжение $5,5 \cdot 10^8$ Па. Лифт движется вверх с ускорением $0,5 \text{ м/с}^2$. Каким запасом прочности обладает трос, если его поперечное сечение $1,4 \text{ см}^2$?

25.8. Для взятия пробы грунта со дна океана используется специальный прибор, опускаемый на стальном тросе. Какова предельная глубина погружения прибора, если предел прочности на разрыв стального троса $5 \cdot 10^8$ Па? Масса прибора по сравнению с массой троса пренебрежимо мала. Плотность стали $7,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, плотность морской воды $1,03 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

Получение монокристаллов. Кристаллы ряда элементов и многих химических веществ обладают замечательными механическими, электрическими, магнитными и оптическими свойствами. Так, например, алмаз тверже любого другого материала, встречающегося на Земле. Кристаллы кварца и слюды, германия и кремния обладают электрическими свойствами, обеспечивающими им широкое применение в электротехнике и электронике. Кристаллы флюорита, турмалина, исландского шпата и многие другие находят применение при изготовлении оптических приборов.

В природе монокристаллы большинства веществ без трещин, загрязнений и других дефектов встречаются очень редко, поэтому такие кристаллы с древнейших времен люди называют драгоценными камнями. Алмаз, рубин, сапфир, аметист и другие драгоценные камни ценились людьми очень высоко в основном не за особые механические или другие физические свойства, а лишь из-за своей редкости и красоты.

Развитие науки и техники привело к тому, что многие редко встречающиеся в природе кристаллы стали очень нужными для изготовления деталей приборов, машин, для выполнения научных исследований. Потребность во многих кристаллах возросла настолько, что удовлетворить ее за счет расширения масштабов выработки старых и поисков новых природных месторождений оказалось невозможным. Возникла задача разработки технологии искусственного изготовления монокристаллов многих элементов и химических соединений.

Большинство драгоценных камней являются кристаллами широко распространенных в природе химических элементов и соединений. Так, алмаз — это кристалл углерода, рубин и сапфир — кристаллы оксида алюминия с различными примесями. Поэтому разработка сравнительно простого способа изготовления «драгоценного» камня приводит к тому, что он перестает быть драгоценным.

Наиболее распространенные способы выращивания монокристаллов — кристаллизация из расплава и кристаллизация из раствора.

Трудности выращивания монокристаллов многих веществ связаны с тем, что эти вещества плохо растворимы и имеют высокую температуру плавления. Например, для получения кристалла рубина нужно расплавить порошок оксида алюминия, а его температура плавления 2030 °С. Порошок оксида алюминия высыпается тонкой струей в кислородно-водород-

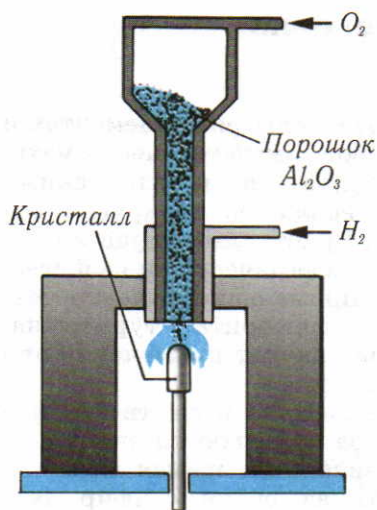


рис. 2.47

ное пламя, плавится и в виде капле падает на стержень из тугоплавкого материала. На стержне постепенно вырастает кристалл рубина (рис. 2.47).

Кристаллы из раствора выращивают при медленном испарении растворителя из насыщенного раствора или при медленном понижении температуры раствора.

Применение кристаллов.

Применения кристаллов в науке и технике очень разнообразны. Около 80% всех добываемых природных алмазов и все искусственные алмазы используются в промышленности.

Алмазные инструменты применяются для обработки дета-

лей из самых твердых материалов, используются в буровых инструментах при разведке и добыче полезных ископаемых. Алмазы служат опорными камнями в хронометрах высшего класса для морских судов и в других особо точных приборах. На алмазных подшипниках не обнаруживается никаких следов износа даже после 25 000 000 оборотов.

Из 1 кг синтетического рубина удается изготовить около 40 000 опорных камней для часов. Незаменимыми оказались рубиновые стержни на фабриках по изготовлению химического волокна. Нитеводители из самого твердого стекла при протяжке через них искусственного волокна изнашиваются за несколько дней, рубиновые нитеводители практически не изнашиваются.

Новая область для широкого применения рубинов в научных исследованиях и в технике открылась с изобретением рубинового лазера — прибора, в котором рубиновый стержень служит мощным источником света, испускаемого в виде тонкого светового пучка.

Исключительная роль выпала на долю кристаллов в современной электронике. Большинство полупроводниковых электронных приборов изготовлено из кристаллов германия или кремния.

Дефекты в кристаллах. Способы повышения прочности твердых тел. Полукристаллическими телами являются все металлические изделия — стальные каркасы зданий и мостов, рельсы железных дорог, линии электропередач, станки, машины, поезда, самолеты. Одной из важнейших задач науки и техники является создание прочных и надежных ма-

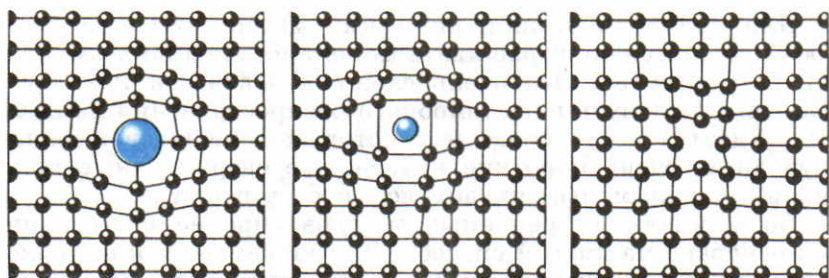


рис. 2.48

шин, станков и зданий с минимальными затратами металлов и других материалов.

Сравнение реальной прочности кристаллов со значением, полученным на основании теоретических расчетов, обнаруживает весьма существенные расхождения. Теоретический предел прочности в десятки и даже в сотни раз превосходит значения, получаемые при испытаниях реальных образцов.

Оказалось, что причина расхождения теории и эксперимента — наличие внутренних и поверхностных дефектов в строении кристаллических решеток.

Точечные дефекты в идеальной кристаллической решетке возникают в результате замещения собственного атома чужеродным, внедрения атома в междоузлие, отсутствия атома в одном из узлов кристаллической решетки (рис. 2.48). Нарушение в порядке расположения атомных плоскостей в кристалле (наличие лишней полуплоскости) называется *дислокацией* (рис. 2.49, а).

Деформация и разрушение кристалла с дефектом типа дислокации облегчаются, так как вместо одновременного разрыва всех связей между атомами двух плоскостей становится возможным поочередный разрыв небольшого числа связей между атомами с постепенным перемещением дефекта в кристалле (рис. 2.49, б, в).

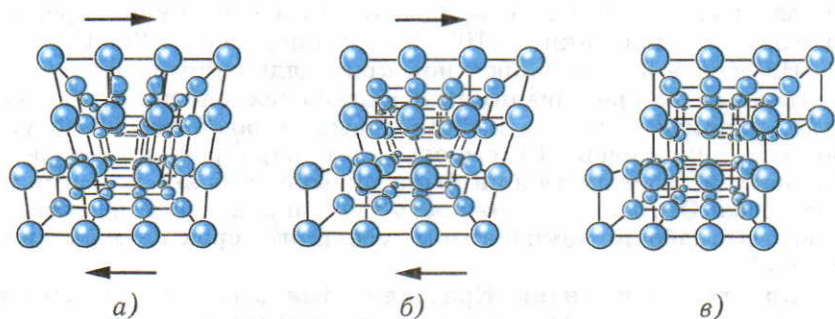


рис. 2.49

Для получения кристаллических материалов с высокой прочностью нужно выращивать монокристаллы по возможности без дефектов. Это очень сложная задача, и поэтому в практике этот путь пока широкого распространения не получил. Удастся из углерода и некоторых минералов выращивать лишь очень короткие нитевидные сверхпрочные кристаллы с очень малым числом дефектов в решетке.

Большинство современных методов упрочнения материалов основано на другом способе. Для упрочнения кристаллов с дефектами в решетке вместо устранения дефектов можно создать условия, при которых перемещение дефектов в кристалле затрудняется. Препятствием для перемещения дефектов в кристалле могут служить другие дефекты, специально созданные в кристаллической решетке. Так, для увеличения прочности стали применяется *легирование* — введение в расплав небольших добавок хрома, вольфрама и других элементов. Внедрение атомов чужеродных элементов в кристаллы железа затрудняет перемещение дефектов при деформации кристаллов, при этом прочность стали повышается примерно в три раза. Дополнительные дефекты в кристаллической решетке создаются при протяжке, дробеструйной обработке металлов. Эти виды обработки могут повышать прочность металлов примерно в два раза.

Приблизить практическую прочность металлов к теоретической можно и другим способом — высокоскоростной кристаллизацией. Чем быстрее отводится тепло от затвердевшего слитка, т. е. чем больше скорость кристаллизации, тем меньше размеры кристаллов и тем тоньше межзеренные прослойки. Такая структура обладает лучшими физическими и механическими характеристиками. Но крупные слитки металла невозможно охладить быстро. Сверхскоростное охлаждение до 10^4 К в секунду осуществляется в «слитках» размером 5—500 мкм. Для этого расплавленный металл струей нейтрального газа с помощью форсунки распыляется в мельчайшую пыль. В таких условиях гранулы затвердевают за ничтожные доли секунды. Затем эти гранулы спрессовывают при давлении $2 \cdot 10^8$ Па и температуре 1200°C .

На основе высокоскоростной кристаллизации и последующего горячего прессования разработана технология производства, например, дисков из никелевых сплавов для газотурбинных двигателей. Таким способом жаропрочность дисков паровых и газовых турбин была повышена более чем в полтора раза. Это дало возможность уменьшить массу агрегатов, повысить рабочие температуры, увеличить срок службы двигателей.

Кристаллы и жизнь. Кристалл обычно служит символом неживой природы. Однако грань между живым и неживым установить очень трудно, и понятия «кристалл» и «жизнь»

не являются взаимоисключающими. Простейшие живые организмы — вирусы — могут соединяться в кристаллы. Конечно, в кристаллическом состоянии они не обнаруживают никаких признаков живого, так как сложные жизненные процессы в кристаллах протекать не могут. Но при изменениях внешних условий на благоприятные (такowymi для вирусов являются условия внутри клеток живого организма) они начинают двигаться, размножаться.

Кристалл и живой организм представляют собой примеры осуществления крайних возможностей в природе. В кристалле неизменными остаются не только сами атомы и молекулы, но также их взаимное расположение в пространстве. В живом организме не только не существует сколько-нибудь постоянной структуры в расположении атомов и молекул, но ни на одно мгновение не остается неизменным его химический состав. В процессе жизнедеятельности организма одни химические соединения разлагаются на более простые, другие, наоборот, синтезируются из простых.

Но при всех химических процессах, протекающих в живом организме, организм остается самим собой в течение десятков лет! Более того, потомки каждого живого организма являются удивительно близкой его копией! Следовательно, в клетках любого животного или растения имеется что-то постоянное, неизменное, способное управлять химическими процессами, протекающими в них. Такими носителями «программы» процессов, протекающих в живой клетке, оказались молекулы дезоксирибонуклеиновой кислоты, называемой кратко ДНК. В клетках человеческого организма одна такая молекула имеет длину несколько сантиметров! Имея очень малую толщину, молекулы укладываются спирально, клубком внутри клеток, видимых лишь в микроскоп.

Молекулы ДНК не только управляют процессами жизнедеятельности клетки, но и несут в себе полную информацию о строении и развитии всего живого организма из одной клетки! С полным основанием можно сказать, что молекула ДНК является основой жизни, носителем всех наследственных признаков организма.

Согласно современным данным, молекула ДНК представляет собой двойную спираль, составленную из небольшого числа сравнительно простых молекулярных соединений, повторяющихся в строго определенном для данного вида порядке. Диаметр молекулы ДНК равен $2 \cdot 10^{-9}$ м, а длина может достигать нескольких сантиметров. Такие молекулы с точки зрения физики рассматриваются как особый вид твердого тела — одномерные аperiодические кристаллы. Следовательно, кристаллы — это не только символ неживой природы, но и основа жизни на Земле.

■ Вопросы

1. Где применяются кристаллы на практике? 2. Для чего выращивают искусственные кристаллы? 3. Какими способами получают искусственные кристаллы? 4. Какие дефекты бывают в структуре кристаллов? 5. Какое влияние на свойства кристаллов оказывают дефекты в строении кристаллической решетки? 6. Какими способами повышают прочность кристаллических тел? 7. Какова роль кристаллов в живых организмах?

§ 27

Жидкие кристаллы

Большинство веществ может находиться в трех агрегатных состояниях — твердом, жидком и газообразном. Однако некоторые органические вещества, молекулы которых имеют нитевидную форму или форму плоских пластин, могут находиться в особом состоянии, обладая одновременно свойствами анизотропии и текучести. Это состояние, сочетающее свойства кристалла и жидкости, называют *жидкокристаллическим*. В среднем на каждые 200 сложных органических соединений приходится одно, способное к образованию жидких кристаллов.

Строение жидких кристаллов. Наиболее простые жидкие кристаллы образуются длинными сигарообразными или нитевидными молекулами. В жидкокристаллическом состоянии «сигары» параллельны друг другу, но беспорядочно сдвинуты вдоль своих осей (рис. 2.50).

Одновременное сочетание свойства кристаллов — анизотропии — и свойства жидкости — текучести — объясняется тем, что вытянутые молекулы, как и в «настоящих» кристаллах, расположены упорядоченно. Но в отличие от кри-

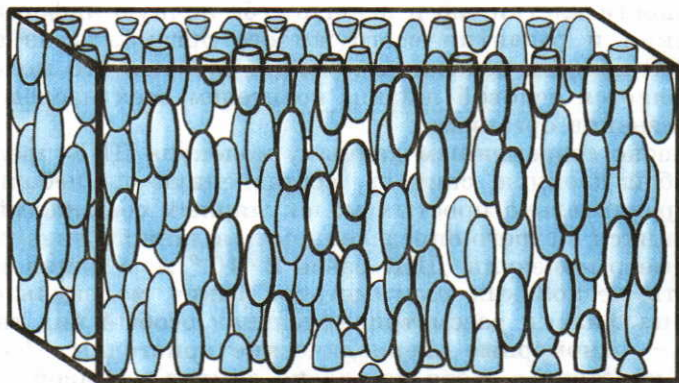


рис. 2.50

таллов, где «дальний порядок» расположения атомов или молекул имеется во всех трех направлениях, в жидких кристаллах он существует лишь в одном направлении. Молекулы жидкого кристалла совершают тепловое движение весьма своеобразно. Их центры масс движутся хаотично, но оси молекул при этом перемещаются параллельно самим себе и осям других соседних молекул, сохраняя взаимную ориентацию. Зависимость свойств вещества от направления ориентации молекул вызывает макроскопическую анизотропию в большой области.

Жидкокристаллическое состояние существует в определенном для каждого вещества интервале температур. Удлиненная форма молекул вещества — условие необходимое, но недостаточное для образования жидких кристаллов. Например, молекулы парафина $\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2\dots$ длинные, но жидких кристаллов не образуют потому, что им не хватает жесткости и они легко изгибаются. Но и жесткость не является достаточным условием. Имеется много веществ с длинными и жесткими молекулами, но неспособных образовать жидкокристаллическое состояние. Способность вещества образовывать жидкие кристаллы определяется не только формой и механическими свойствами молекул, но и характером сил молекулярного взаимодействия.

Оптические свойства жидких кристаллов. Ориентация молекул распространяется обычно не на весь объем жидкого кристалла, а лишь на небольшие его области — домены. На границе раздела двух доменов происходит частичное отражение и преломление света. Поэтому жидкие кристаллы непрозрачны, как молоко.

Но если разместить жидкий кристалл между двумя параллельными пластинами с зазором 0,01—0,1 мм с параллельными микробороздами глубиной и шириной 10—100 нм, то все молекулы тонкого слоя будут ориентированы одинаково, а полученная пленка жидкого кристалла будет прозрачной (рис. 2.51).

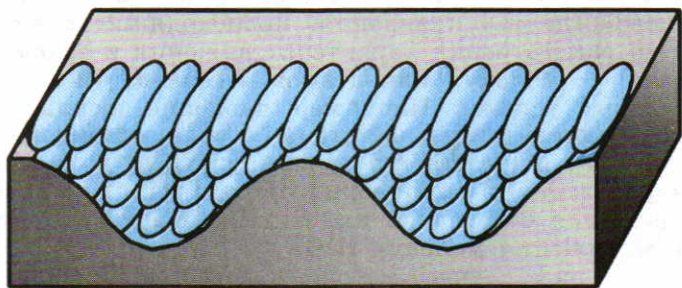


рис. 2.51

Для получения изображений цифр и букв с использованием жидких кристаллов на стеклянные пластины наносят прозрачные и токопроводящие слои оксида олова в виде шрифта, подобно «восьмеркам» на почтовых конвертах. Элементы «восьмерки» электрически изолированы. Пластины склеивают так, чтобы направления полировки совпадали, токопроводящие элементы «восьмерок» находились с внутренней стороны и были обращены друг к другу. Зазор между пластинами, составляющий 10—30 мкм, заполняют жидким кристаллом. На прозрачные электроды в нужной комбинации подают напряжение. В участках жидкого кристалла, находящихся под напряжением, разрушается жидкокристаллическая структура. Вследствие сильного рассеяния света эти участки становятся непрозрачными. В результате элементы «восьмерки», на которые подано напряжение, начинают «светиться», а окружающее их поле и элементы «восьмерок» без напряжения остаются темными из-за прозрачности.

Жидкокристаллические устройства с большим числом элементов и сложной электронной схемой управления могут служить телевизионными экранами.

■ Вопросы

1. Что такое жидкие кристаллы? 2. Какими свойствами обладают молекулы веществ, способных существовать в жидкокристаллическом состоянии? 3. Какие свойства жидких кристаллов находят практическое применение?



ГЛАВА 3

ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ

§ 28

Термодинамический метод

Термодинамика. Молекулярно-кинетическая теория объясняет свойства тел и явления, происходящие в веществе, исходя из рассмотрения характера движения и взаимодействия частиц — молекул или атомов, и она достигает в этом значительных успехов. Например, давление идеального газа объясняется бомбардировкой стенок сосуда огромным числом молекул, а зависимость его от температуры количественно точно описывается в этой теории, исходя из представления о связи давления со средней кинетической энергией поступательного движения молекул газа.

Однако в ряде случаев методы молекулярной физики оказываются слишком сложными для количественного описания явлений. В частности, для того чтобы методами кинетичес-

кой теории получить количественную связь между параметрами состояния реального газа, жидкости или твердого тела, следует учитывать силы, действующие между частицами вещества. Это в большинстве случаев сделать сложно, а часто вообще невозможно.

Между тем многие соотношения между параметрами состояния вещества можно вывести, ничего не зная о внутреннем «механизме» явлений, обуславливающим эту связь.

Раздел физики, в котором изучаются свойства тел без использования представлений о характере движения и взаимодействия частиц, из которых они состоят, называется *термодинамикой*.

Термодинамика рассматривает свойства тел и явления, происходящие в них, опираясь на некоторые общие законы («начала») термодинамики, являющиеся обобщением огромного числа опытных фактов. Законы термодинамики и молекулярно-кинетическая теория дополняют друг друга, расширяют возможности изучения общих свойств систем, состоящих из большого числа частиц.

Первоначально термодинамика возникла как наука об использовании теплоты для получения работы, т. е. как теоретическая теплотехника. Ее задача состояла в изучении закономерностей создания наиболее экономичных тепловых двигателей. Однако «попутно» были открыты законы термодинамики, обладающие большой общностью. Эти законы относятся к преобразованиям энергии, ее изменениям в различных процессах и к ряду связанных с ней величин. Отсюда понятна общность законов термодинамики — ведь энергетические превращения сопутствуют всем явлениям природы. Поэтому современная термодинамика определяется как учение о наиболее общих свойствах макроскопических физических систем, находящихся в состоянии термодинамического равновесия, и о процессах перехода между этими состояниями.

Представим себе, что у нас имеется система тел, где в разных точках параметры состояния или хотя бы один из них, например температура, имеют различные значения. В этом случае мы не можем приписать всей системе какую-то определенную температуру. Состояние такой системы называют *неравновесным*. Если такую систему изолировать и предоставить самой себе, то произойдет процесс выравнивания температуры, после чего процесс теплообмена прекратится — наступит термодинамическое равновесие. *Равновесным* называется такое состояние, при котором параметры системы имеют определенные значения, одинаковые для всех ее частей.

Переход системы из одного равновесного состояния в другое равновесное состояние представляет собой последователь-

ность неравновесных состояний, т. е. является неравновесным. Однако если такой переход происходит очень медленно, то параметры состояния в разных точках системы мало будут отличаться друг от друга. *Бесконечно медленный процесс* состоит из *последовательности равновесных состояний*, т. е. он является равновесным (квазистатическим) процессом.

Термодинамическая система. В термодинамике часто используется предположение о возможности выделения совокупности тел, не взаимодействующих с другими телами.

Совокупность физических тел, изолированную от взаимодействия с другими телами, называют *изолированной термодинамической системой*. Состояние термодинамической системы полностью описывается некоторым числом независимых физических параметров.

Внутренняя энергия. Одним из важнейших параметров термодинамической системы является ее внутренняя энергия. *Внутренней* энергией системы называют ту часть ее полной энергии, которая определяется собственными параметрами этой системы. Внутренняя энергия тела складывается из кинетической энергии хаотичного теплового движения составляющих его частиц (атомов или молекул) и потенциальной энергии их взаимодействия. Кинетическая и потенциальная энергия тела как целого во внутреннюю энергию не входит.

Вычислить внутреннюю энергию путем подсчетов энергии всех взаимодействующих между собой многих миллиардов частиц нет никакой практической возможности, так как законы зависимости сил взаимодействия атомов и молекул от расстояния между ними сложны, а взаимное расположение частиц в результате теплового движения непрерывно изменяется. Также беспорядочно меняется и кинетическая энергия отдельных частиц.

Простое решение эта задача имеет для случая идеального газа.

Внутренняя энергия идеального газа. Внутренняя энергия идеального газа представляет собой сумму только кинетических энергий теплового движения его частиц, поскольку взаимодействием частиц у идеального газа можно пренебречь. Наиболее просто можно вычислить внутреннюю энергию идеального одноатомного газа (гелия, неона, аргона и др.), так как его молекулы (атомы) совершают только поступательное движение.

Средняя кинетическая энергия молекул такого газа равна $\frac{3}{2} kT$. Поэтому внутренняя энергия газа, состоящего из N молекул, равна $U = \frac{3}{2} NkT$. Так как $N = \frac{m}{M} N_A$, то $U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} N_A kT = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT$.

Внутренняя энергия идеального газа зависит только от одного параметра — его абсолютной температуры: $U = f(T)$.

Два способа изменения внутренней энергии. Внутренняя энергия изолированной термодинамической системы может изменяться двумя способами: при совершении работы и при теплообмене (теплопередаче). Напомним, что *количеством теплоты* называется энергия, передаваемая путем теплообмена.

Количество теплоты, необходимое для нагревания тела, определяется по формуле

$$Q = cm\Delta T,$$

где c — удельная теплоемкость вещества; $\Delta T = T_2 - T_1$ — изменение температуры. Изменить внутреннюю энергию тела можно, приведя его в соприкосновение с другим телом, имеющим более высокую или низкую температуру, например с более холодным телом. При этом горячее тело передает часть своей энергии более холодному, т. е. часть энергии беспорядочного движения частиц горячего тела переходит в энергию беспорядочного движения частиц более холодного тела. В результате температуры тел выравниваются. Но так как при этом не перемещаются ни сами тела, ни их части, то работа при этом не совершается.

Как известно, работа — это макроскопический процесс; она совершается только при упорядоченном перемещении тела, когда все его частицы движутся вместе, в одном направлении. Внутренняя же энергия связана с беспорядочным тепловым движением частиц вещества. Следовательно, для того чтобы за счет внутренней энергии тела можно было совершить работу, необходимо каким-либо способом хотя бы частично преобразовать хаотическое движение его частиц в упорядоченное движение.

Для этого можно использовать газ, находящийся в цилиндре с поршнем. Если давление газа под поршнем больше давления окружающего воздуха, то за счет энергии беспорядочного движения молекул газа произойдет перемещение поршня в цилиндре. Газ расширится, его объем увеличится, и при этом сила, с которой газ действует на поршень, совершит положительную работу (направления силы и перемещения совпадают). Таким образом, сила давления при расширении газа совершает работу за счет его внутренней энергии.

■ Вопросы

1. Какими способами можно изменить внутреннюю энергию тела?
2. Что такое количество теплоты? 3. Как рассчитать количество теплоты, отдаваемое или получаемое телом при изменении его температуры? 4. При помощи какого простейшего устройства можно преобразовать энергию хаотиче-

ского движения молекул в механическую энергию? 5. Приведите примеры процессов, при которых механическая энергия превращается во внутреннюю. 6. Из чего складывается внутренняя энергия идеального газа?

■ ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Задача. Чему равна внутренняя энергия 12 моль гелия при температуре 27 °С?

Решение. Внутренняя энергия одноатомного газа определяется по формуле $U = 3/2 \frac{m}{M} RT$, где $\frac{m}{M} = \nu$ — число молей вещества.

Значит, $U = 3/2 \nu RT$. Так как $T = 273 + t = 300$ К, то

$$U = 3/2 \cdot 12 \cdot 8,31 \cdot 300 \text{ Дж} = 4,48 \cdot 10^3 \text{ Дж} = 4,48 \text{ кДж}.$$

■ ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

28.1. Чему равна внутренняя энергия гелия массой 4 г, если его абсолютная температура равна 127 К?

28.2. Температура аргона, масса которого 20 г, повысилась на 10 К. Чему равно изменение его внутренней энергии?

28.3. Чему равно изменение внутренней энергии идеального одноатомного газа, взятого в количестве 10 моль, при его охлаждении на 20 К?

28.4. Два моля одноатомного идеального газа при температуре 200 К изохорно перевели в состояние, в котором давление в два раза больше первоначального, а затем изобарно в состояние, в котором объем в два раза больше первоначального. Найдите изменение внутренней энергии газа. Начертите график этого процесса в осях p, V .

28.5. Азот находится в закрытом сосуде при температуре 128 К и давлении 1400 Па. Газ нагревают до температуры 10000 К, при которой молекулы азота практически полностью распадаются на атомы. Определите давление газа в сосуде при этих условиях. Какой внутренней энергией обладает 1 л разогретого азота?

§ 29 Первый закон термодинамики

Закон сохранения энергии. Прделаем такой опыт. Резким ударом по рукоятке воздушного огнива сожжем воздух в цилиндре (рис. 3.1). После прекращения действия внешней силы сжатый воздух расширится и выбросит поршень из цилиндра.

Этот опыт показывает, что возможны взаимные превращения различных видов энергии: сначала механическая энергия превращается во внутреннюю энергию сжатого газа, затем внутренняя энергия газа превращается в механическую энергию поступательного движения поршня.

Анализ результатов опытов и наблюдений природных явлений, выполненных к середине XIX в., привел немецких

ученых Р. Майера и Г. Гельмгольца, английского ученого Д. Джоуля к выводу о существовании *закона сохранения энергии*: при любых взаимодействиях тел энергия не исчезает бесследно и не возникает из ничего. Энергия только передается от одного тела к другому или превращается из одной формы в другую. Внутренняя энергия U системы, изолированной от любых взаимодействий с внешней средой, не изменяется при любых взаимодействиях внутри системы. Следовательно, для изолированной системы справедливо соотношение

$$U = \text{const, или } \Delta U = 0. \quad (29.1)$$

Первый закон термодинамики. Рассмотрим примеры применения закона сохранения энергии к процессам, в которых происходит превращение механической энергии во внутреннюю энергию тел или внутренней энергии тел в механическую.

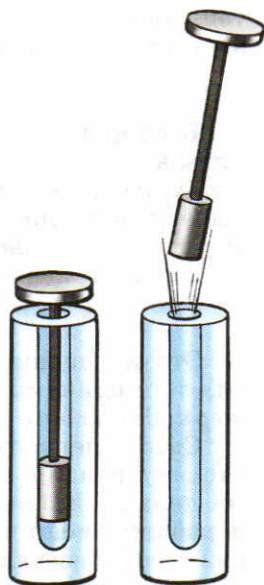


рис. 3.1

При ударе молотка по свинцовой пластине изменяются кинетическая энергия молотка и внутренняя энергия свинцовой пластины. Кинетическая энергия молотка убывает, внутренняя энергия пластины возрастает. В соответствии с законом сохранения энергии в изолированной системе молоток — пластина полная энергия системы тел при их взаимодействии не изменилась. Следовательно, внутренняя энергия пластины увеличилась настолько, насколько уменьшилась кинетическая энергия молотка:

$$\Delta U_{\text{пл}} = -(\Delta E_k)_{\text{мол}}.$$

Мерой изменения кинетической энергии молотка является работа сил, действующих на него со стороны пластины:

$$A = (\Delta E_k)_{\text{мол}}.$$

Молоток и пластина действуют друг на друга равными по модулю и противоположно направленными силами (третий закон Ньютона). Работа этих сил равна:

$$A' = -A = -(\Delta E_k)_{\text{мол}}.$$

Следовательно, изменение внутренней энергии свинцовой пластины равно работе внешних сил:

$$\Delta U_{\text{пл}} = A'.$$

Если внутренняя энергия тела изменяется в результате

теплообмена с другими телами, то изменение внутренней энергии равно количеству теплоты Q , переданному телу:

$$\Delta U = Q.$$

В общем случае внутренняя энергия системы может меняться как за счет работы внешних сил, так и за счет теплообмена с окружающими телами. Мы пришли к важному выводу: в термодинамической системе изменение внутренней энергии ΔU равно сумме количества переданной теплоты Q и работы A' внешних сил:

$$\Delta U = Q + A'. \quad (29.2)$$

Это обобщение закона сохранения и превращения энергии для термодинамической системы называется *первым законом термодинамики*.

Смысл первого закона термодинамики заключается в том, что внутренняя энергия тела, взаимодействующего с другими телами, меняется за счет двух процессов — теплообмена и работы внешних сил. Любое увеличение внутренней энергии тела обязательно сопровождается уменьшением в равной количественной мере энергии взаимодействующих с ним тел. Работа A' внешних сил является мерой энергии, переданной телу при механическом взаимодействии его с другими телами; количество теплоты Q является мерой энергии, переданной от других тел путем теплопередачи.

Вместо работы A' , совершаемой внешними силами над термодинамической системой, часто удобнее бывает рассматривать работу A , совершаемую термодинамической системой над внешними телами. Так как эти работы равны по модулю, но противоположны по знаку: $A = -A'$, то первый закон термодинамики можно записать так:

$$\Delta U = Q - A. \quad (29.3)$$

Изменение внутренней энергии термодинамической системы равно разности полученного количества теплоты Q и работы A , совершенной системой.

При рассмотрении процессов в газах уравнение (29.3) следует применять в тех случаях, когда газ расширяется и совершает положительную работу над внешними телами. Примером такого процесса может служить нагревание газа в цилиндре, в результате чего газ расширяется и совершает работу.

Из первого закона термодинамики следует, что при передаче телу количества теплоты его внутренняя энергия может увеличиться, уменьшиться или остаться неизменной в зависимости от того, какую работу производит система против внешних сил. При одном и том же изменении внутренней энергии тела от него можно получить разное количество теп-

лоты в зависимости от той работы, которую совершает тело. Поэтому такое понятие, как «запас количества теплоты в теле», не имеет смысла.

Вечный двигатель. Современная жизнь человека невозможна без использования самых разнообразных машин. С помощью машин человек обрабатывает землю, собирает урожай, добывает нефть, уголь, руду, строит дома, дороги, совершает поездки по земле, по воздуху, по воде.

Основным общим свойством всех этих машин является их способность совершать работу. Многие изобретатели в прошлом пытались построить машину, способную совершать полезную работу без потребления энергии извне и без каких-либо изменений внутри самой машины. Машину с такими свойствами называют *вечным двигателем первого рода*. Все эти попытки окончились неудачей. Невозможность создания вечного двигателя первого рода подтверждает тем самым первый закон термодинамики. Согласно первому закону термодинамики (29.3), работа A , произведенная машиной, равна:

$$A = Q - \Delta U. \quad (29.4)$$

Любая машина может совершать работу над внешними телами только за счет получения извне некоторого количества теплоты или уменьшения ее внутренней энергии.

■ Вопросы

1. В чем заключается смысл закона сохранения энергии? 2. К каким системам применим закон сохранения энергии? 3. Как формулируется первый закон термодинамики? 4. К каким системам применим первый закон термодинамики? 5. Что является доказательством справедливости первого закона термодинамики?

■ Пример решения задачи

Задача. Некоторой термодинамической системе передано количество теплоты, равное 100 Дж. Как изменилась внутренняя энергия системы, если при этом она совершила работу 300 Дж?

Решение. Применим к термодинамической системе первый закон термодинамики (29.3): $\Delta U = Q - A$, где A — работа, совершенная системой.

$$\Delta U = 100 \text{ Дж} - 300 \text{ Дж} = -200 \text{ Дж}.$$

Внутренняя энергия системы уменьшилась на 200 Дж.

■ Задачи для самостоятельного решения

29.1. Термодинамической системе передано количество теплоты, равное 2000 Дж, и над ней совершена работа 500 Дж. Определите изменение внутренней энергии этой системы.

29.2. В результате совершения работы внешними силами и теплопередачи внутренняя энергия термодинамической системы увеличилась на 200 Дж. Какое количество теплоты было передано термодинамической системе, если при этом внешние силы совершили работу 50 Дж?

29.3. Какое количество теплоты нужно передать идеальному газу, находящемуся в цилиндре под поршнем, для того чтобы внутренняя энергия газа увеличилась на 100 Дж и при этом газ совершил работу 200 Дж?

29.4. Определите работу внешних сил над термодинамической системой, если изменение внутренней энергии системы составило 500 Дж при передаче ей количества теплоты 400 Дж.

29.5. В результате получения количества теплоты 800 Дж воздух в цилиндре расширился и совершил работу 200 Дж. Как изменилась при этом внутренняя энергия воздуха?

29.6. Какую работу совершил газ при передаче ему количества теплоты 10^4 Дж, если его внутренняя энергия при этом увеличилась на $2 \cdot 10^4$ Дж?

§ 30 Работа при изменении объема газа

Сила давления газа совершает работу при его расширении, т. е. при изменении объема. Если газ, расширяясь при постоянном давлении, сместил поршень на расстояние Δl (рис. 3.2, а), то работа, совершенная при этом силой давления F , будет равна:

$$A = F\Delta l,$$

или

$$A = pS\Delta l,$$

где S — площадь поверхности поршня; p — давление газа. Из рисунка видно, что произведение $S\Delta l$ равно изменению объема газа от его первоначального значения V_1 до конечного значения V_2 , т. е. $S\Delta l = V_2 - V_1 = \Delta V$, следовательно,

$$A = p(V_2 - V_1), \text{ или } A = p\Delta V. \quad (30.1)$$

Работа расширения газа в изобарном процессе равна произведению давления газа на изменение его объема. Эта работа положительна при расширении газа, поскольку сила давления газа и перемещение поршня направлены одинаково. Если же газ сжимается (рис. 3.2, б), то работа силы, с которой газ действует на поршень, отрицательна (так как $\Delta V < 0$), а работа внешней силы, сжимающей газ, будет при этом положительной: $A' = -A$, т. е. $A' > 0$.

Формула (30.1) относится к случаю, когда давление газа при его расширении или сжатии остается постоянным. График этого процесса (в координатах p, V) изображен на

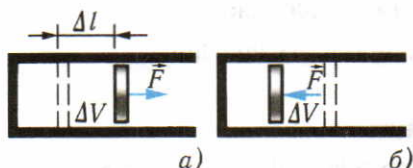


рис. 3.2

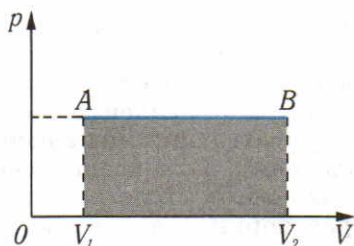


рис. 3.3

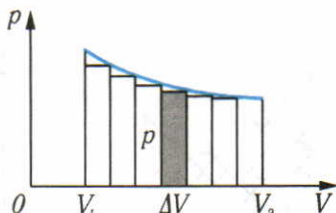


рис. 3.4

рисунке 3.3 отрезком AB , параллельным оси абсцисс. Из формулы (30.1) следует, что работа при изобарном расширении численно равна площади фигуры (в выбранном масштабе), закрашенной на рисунке 3.3.

При изменении объема газа часто изменяется и его давление. Как в этом случае найти работу? Для вычисления работы воспользуемся графическим методом. Допустим, что газ расширяется и при этом его давление изменяется, например уменьшается (рис. 3.4). Выделим на кривой небольшие участки, соответствующие малому изменению объема ΔV , и из концов каждого участка опустим перпендикуляры на ось объемов. Если ΔV достаточно мало, то получившиеся полоски (одна из них на рисунке закрашена) могут считаться прямоугольниками. Площадь каждого из них численно равна произведению давления p , соответствующего выбранному участку (одна сторона прямоугольника), на изменение объема ΔV (другая его сторона). Но произведение $p\Delta V$ равно работе при малом изменении объема ΔV . Из таких малых прямоугольников складывается вся площадь под графиком зависимости давления от объема. Значит, площадь под кривой и выражает в выбранном на графике масштабе работу силы давления газа при его расширении от объема V_1 до объема V_2 (рис. 3.5, а). Если газ сжимать вдоль той же кривой, то работа газа по-прежнему будет определяться площадью фигуры под кривой, но знак ее будет отрицательным (рис. 3.5, б).

Работа при циклических процессах. Процессы изменения состояния газа, в результате которых газ возвращается в ис-

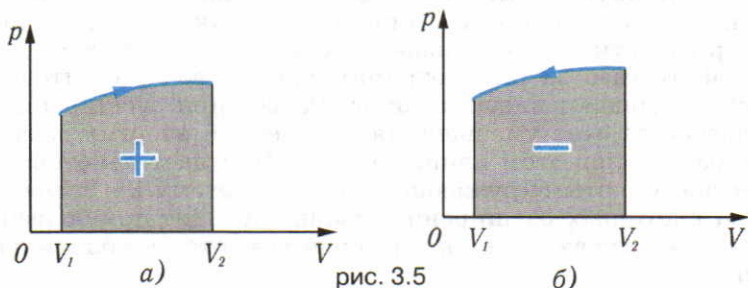


рис. 3.5

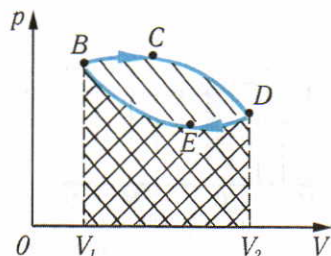


рис. 3.6

ходное состояние, называют *круговыми* или *циклическими*. При возвращении газа в исходное состояние его давление, объем и температура принимают начальные значения. В консервативных системах работа силы по замкнутой траектории равна нулю. Как обстоит дело с работой при циклических процессах?

Рассмотрим диаграмму кругового процесса, представленную на рисунке 3.6. Идеальный газ сначала расширяется из состояния *B* в состояние *D* через состояние *C*. При расширении он совершает положительную работу, пропорциональную площади фигуры под кривой *BCD*. При сжатии газа из состояния *D* в состояние *B* через состояние *E* совершается положительная работа внешними силами, а работа газа отрицательна. Она пропорциональна площади фигуры под кривой *DEB*. Полная работа газа за цикл равна сумме работ при расширении и сжатии газа. Так как работа газа при сжатии отрицательна, полная работа за цикл пропорциональна разности площадей фигур под кривыми *BCD* и *DEB*, т. е. пропорциональна площади фигуры *BCDEB*, ограниченной диаграммой кругового процесса в координатных осях $p - V$.

При осуществлении кругового процесса в направлении *BCDEB* полная работа газа за цикл положительна, так как при расширении газ совершает большую работу, чем затрачивается на его сжатие. Круговые процессы такого типа, в которых расширение газа происходит при более высокой температуре, чем сжатие, используются в тепловых двигателях. Процесс расширения в тепловых двигателях происходит в результате нагревания газа, следовательно, работа совершается за счет количества теплоты, получаемого газом от нагревателя.

Если круговой процесс осуществляется в обратном направлении *BEDCB*, то работа газа при расширении меньше работы, которую нужно совершить для сжатия газа и возвращения его в исходное состояние. Так как работа внешних сил при сжатии газа больше работы при расширении, полная работа газа за цикл отрицательна, т. е. положительную работу совершают внешние силы. Работа при расширении совершается за счет уменьшения внутренней энергии газа, его температура при этом понижается, и он отдает некоторое количество теплоты окружающей среде. Поэтому круговые процессы, в которых расширение газа происходит при более низких температурах, чем сжатие, используются в холодильных машинах.

Вопросы

1. Как найти работу, совершаемую газом при изобарном расширении? 2. Как можно сравнить работу, совершенную газом в различных процессах? 3. Почему работа газа при его сжатии отрицательна? 4. Почему работа газа в круговом процессе не равна нулю? 5. При каком условии работа газа в круговом процессе положительна? отрицательна? 6. В каких машинах используются круговые процессы с положительной работой газа за цикл? 7. В каких машинах используются круговые процессы с отрицательной работой газа за цикл? 8. Совершается ли работа при изохорном нагревании газа? Передается ли при этом газу некоторое количество теплоты?

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Задача. Вычислите работу, совершаемую идеальным газом, взятым в количестве 1 моль, при изобарном нагревании на 1 К.

Решение. При изобарном нагревании идеального газа работа, совершаемая газом, равна $A = p\Delta V$.

Так как в условии задачи не даны значения давления газа и изменения его объема, выразим эти величины через известное изменение температуры газа. Для этого воспользуемся уравнением состояния идеального газа:

$$pV_1 = \nu RT_1, \quad pV_2 = \nu RT_2.$$

Из этих уравнений получаем

$$p(V_2 - V_1) = \nu R(T_2 - T_1), \quad p\Delta V = \nu R\Delta T.$$

Отсюда для работы газа при изобарном нагревании будем иметь:

$$A = \nu R\Delta T = 1 \cdot 8,31 \cdot 1 \text{ Дж} = 8,31 \text{ Дж}.$$

Таким образом, молярная газовая постоянная R численно равна работе, совершаемой одним молем идеального газа при изобарном нагревании на 1 К.

Задачи для самостоятельного решения

30.1. С помощью поршня сжимают 1 моль идеального газа и одновременно охлаждают, так что давление остается постоянным. Чему равна работа, совершенная внешней силой при сжатии, если начальные значения объема и температуры соответственно равны 20 дм^3 и 310 К , а конечный объем газа равен 5 дм^3 ?

30.2. До какой температуры при постоянном давлении надо нагреть 2 кг воздуха, взятого при температуре 40°C , чтобы при расширении он совершил работу 5 кДж ? Молярную массу воздуха принять равной $0,029 \text{ кг/моль}$.

30.3. Гелий массой 40 г в изобарном процессе совершил работу 8 кДж . Определите изменение температуры гелия в этом процессе. Молярная масса гелия равна $4 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$.

30.4. Определите работу, совершенную при изобарном расширении 56 г азота, если его начальная температура была 0°C , а объем увеличился в три раза. Молярная масса азота $28 \cdot 10^{-2} \text{ кг/моль}$.

Используя первый закон термодинамики, рассмотрим различные процессы в газах, сопровождающиеся изменениями внутренней энергии. Начнем с процессов в идеальном газе.

Изотермический процесс. В идеальном газе внутренняя энергия однозначно определяется абсолютной температурой. При изотермическом расширении или сжатии газа его температура не изменяется. Изменение внутренней энергии идеального газа в изотермическом процессе равно нулю: $\Delta U_T^1 = 0$. На основании первого закона термодинамики (30.2) при изотермическом расширении идеального газа переданное количество теплоты Q_T равно работе A_T , совершенной газом:

$$Q_T = A_T. \quad (31.1)$$

При изотермическом сжатии идеального газа в соответствии с первым законом термодинамики (29.2) работа внешних сил A' равна переданному количеству теплоты Q_T , взятому с противоположным знаком:

$$A' = -Q_T. \quad (31.2)$$

Поскольку работа внешних сил при сжатии газа положительна, то количество теплоты Q_T , переданной газу, имеет отрицательный знак. Это означает, что при изотермическом сжатии газа происходит теплопередача от газа окружающим телам.

Изохорный процесс. При изохорном процессе работа газа (и внешних сил над газом) равна нулю, поэтому изменение внутренней энергии ΔU_V идеального газа равно полученному количеству теплоты Q_V . Итак, при изохорном процессе

$$A = -A' = 0, \quad \Delta U_V = Q_V. \quad (31.3)$$

Изобарный процесс. Изобарное расширение идеального газа происходит при передаче ему количества теплоты Q_p . В результате нагревания газа происходит увеличение его внутренней энергии и совершение работы расширения:

$$Q_p = \Delta U + A = \Delta U + p\Delta V. \quad (31.4)$$

Для изобарного сжатия газа необходимо совершить работу A' внешними силами. Для того чтобы давление газа при уменьшении объема оставалось постоянным, газ нужно охлаждать, т. е. он должен отдать окружающим телам некоторое количество теплоты. Понижение температуры газа при

¹ В термодинамике принято обозначать индексом внизу тот параметр, который в данном процессе не меняется. Следовательно, ΔU_T означает, что изменение внутренней энергии рассматривается при $T = \text{const}$.

изобарном сжатии свидетельствует об уменьшении его внутренней энергии. Количество теплоты Q_p , отдаваемое окружающим телам при изобарном сжатии газа, больше работы внешних сил, так как изменение внутренней энергии ΔU имеет отрицательный знак:

$$\begin{aligned}\Delta U &= A' - Q_p, \\ Q_p &= A' - \Delta U.\end{aligned}\quad (31.5)$$

Адиабатный процесс. В природе и технике часто происходят процессы, близкие к адиабатным.

Адиабатным называется процесс изменения объема и давления газа при отсутствии теплообмена с окружающими телами, т. е. при условии $Q = 0$.

Отсутствие теплообмена с окружающей средой может быть обеспечено хорошей теплоизоляцией газа. Быстрые процессы расширения или сжатия газа могут быть близкими к адиабатным и при отсутствии теплоизоляции, если время, за которое происходит изменение объема газа, значительно меньше времени, необходимого для установления теплового равновесия газа с окружающими телами.

Примерами адиабатных процессов могут служить процессы сжатия воздуха в воздушном огнive (рис. 3.7), воздуха в цилиндре двигателя внутреннего сгорания. В соответствии с первым законом термодинамики при адиабатном сжатии изменение внутренней энергии газа равно работе внешних сил:

$$\Delta U = A'. \quad (31.6)$$

Так как работа внешних сил при сжатии газа положительна, внутренняя энергия газа увеличивается, его температура повышается.

При адиабатном расширении газ совершает работу A за счет уменьшения внутренней энергии:

$$\Delta U = -A. \quad (31.7)$$

Поэтому температура газа при адиабатном расширении понижается. Это можно обнаружить в опыте с вылетом пробки из бутылки, содержащей насыщенный водяной пар. При накачивании в бутылку с помощью насоса воздуха пробка вылетает, и в бу-

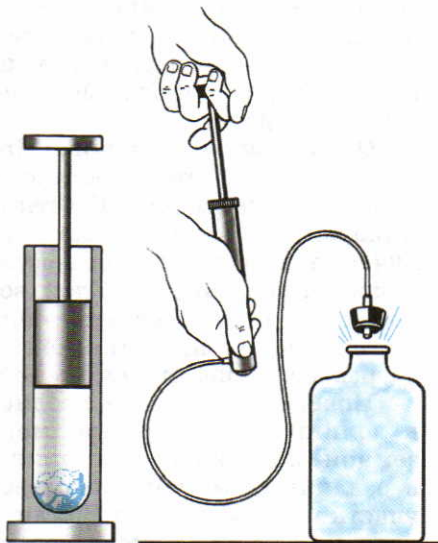


рис. 3.7

рис. 3.8

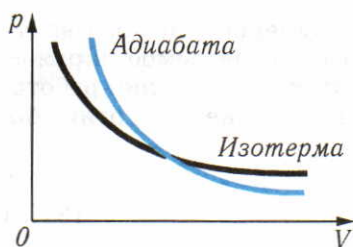


рис. 3.9

тылке образуется туман (рис. 3.8). Работа A по выталкиванию пробки совершается газом за счет уменьшения его внутренней энергии, так как расширение газа происходит за очень короткое время и теплообмен с окружающей средой не успевает произойти. Образование капель тумана из водяного пара доказывает, что при адиа-

батном расширении воздуха его температура понизилась и в данном опыте стала ниже точки росы.

Поскольку при адиабатном сжатии температура газа повышается, давление газа с уменьшением объема растет быстрее, чем при изотермическом процессе. Понижение температуры газа при адиабатном расширении приводит к тому, что давление газа убывает быстрее, чем при изотермическом процессе. График адиабатного процесса в координатных осях p, V представлен на рисунке 3.9. На том же рисунке для сравнения изображен график изотермического процесса.

Мы рассмотрели различные процессы расширения газа, при которых совершается работа. Однако только при адиабатном и изотермическом процессах исключен контакт газа с телами иной температуры — при адиабатном процессе газ теплоизолирован, а при изотермическом он в процессе расширения соприкасается с телом той же температуры (с термостатом). Следовательно, именно в этих процессах исключен переход внутренней энергии газа во внутреннюю энергию других тел, при котором работа не совершается. Поэтому в этих двух процессах изменение внутренней энергии газа или термостата может быть полностью использовано для совершения работы.

Образование облаков. Примером адиабатного процесса в природе является процесс, происходящий в земной атмосфере в летнее время. В летний день земная поверхность, поглощающая большую часть падающего на нее солнечного излучения, имеет более высокую температуру, чем прозрачный атмосферный воздух. Слой воздуха, находящийся у поверхности Земли, нагревается сильнее, чем слой воздуха, расположенный над ним, так как кроме излучения Солнца он подогревается еще снизу земной поверхностью.

Поверхность Земли неоднородна. На ней имеются холмы и долины, леса и степи, моря и горы, поэтому нагревание земной поверхности и прилегающего к ней слоя воздуха в различных местах оказывается неодинаковым. Воздух над участком поверхности Земли, имеющим повышенную температуру по сравнению с соседними участками, в результате нагревания при постоянном давлении расширяется. Пониже-

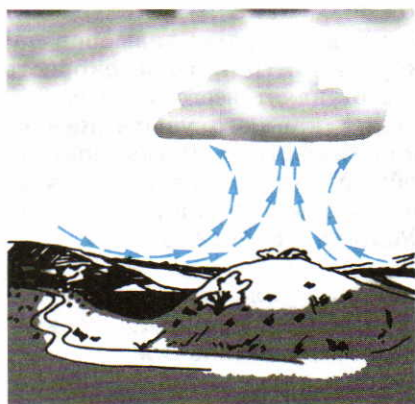


рис. 3.10

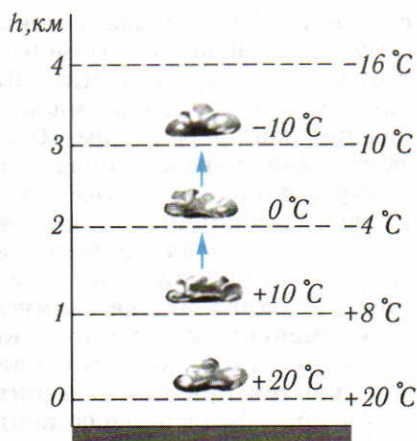


рис. 3.11

ние плотности воздуха при расширении приводит к тому, что он «всплывает» вверх, а его место занимает более плотный и холодный воздух (рис. 3.10).

Однако на этом процесс не останавливается. Подъем некоторого количества теплого воздуха в более высокие слои атмосферы сопровождается его дальнейшим расширением, так как по мере удаления от поверхности Земли атмосферное давление уменьшается. Расширение воздуха происходит адиабатно и поэтому сопровождается его охлаждением. Для сухого воздуха подъем на 100 м по вертикали приводит к его охлаждению на 1°C (рис. 3.11). Очевидно, что подъем нагретого воздуха будет продолжаться до тех пор, пока его температура в результате адиабатного охлаждения не сравняется с температурой воздуха на достигнутой высоте.

Водяной пар, содержащийся в воздухе, при подъеме и охлаждении на некоторой высоте из ненасыщенного становится пересыщенным, при этом происходит конденсация пара и возникает облако, состоящее из мельчайших капель воды. Высота нижней границы облака определяется условием охлаждения поднимающегося воздуха до точки росы.

Конденсация водяного пара в облаке сопровождается выделением тепла, поэтому воздух в облаке охлаждается менее интенсивно, чем вне его. Процесс дальнейшего его расширения и подъема продолжается. Облака могут иметь протяженность по вертикали свыше 10 км. Их вершины даже в самый жаркий летний день находятся в слоях воздуха с температурой ниже 0°C и состоят не из водяных капель, а из кристаллов льда.

Выяснив механизм образования облаков, поставим вопрос: почему они не падают на Землю? Ответить на него не-

сложно. Как показали экспериментальные исследования структуры облаков, размеры водяных капель в них лежат в пределах от 2 до 70 мкм. Капли таких малых размеров падают в воздухе с очень малой скоростью. Например, скорость падения капли радиусом 10 мкм составляет всего 1 см/с. Эффект уменьшения скорости падения капли с убыванием ее радиуса объясняется тем, что сила тяжести, действующая на каплю, пропорциональна ее объему, т. е. кубу радиуса: $F_T \sim V \sim r^3$, а сила сопротивления воздуха пропорциональна скорости движения капли и площади ее поперечного сечения, т. е. квадрату ее радиуса: $F_c \sim vS \sim vr^2$.

С уменьшением радиуса капли сила тяжести убывает быстрее, чем сила сопротивления воздуха, и эти силы уравновешиваются при все меньших скоростях движения.

Осадки. Если процесс конденсации пара в облаке идет более интенсивно, чем процесс испарения капель воды на поверхности облака, развитие облака может завершиться выпадением из него дождя, снега или града.

Образование осадков в облаке происходит примерно следующим образом. По мере подъема вверх восходящим воздушным потоком водяные капли в результате конденсации пара увеличиваются в размерах. Этот процесс продолжается до тех пор, пока размер капли не станет таким, что скорость ее падения превысит скорость подъема восходящего потока воздуха в облаке. Капли, падающие вниз, встречают на своем пути более мелкие капли, поднимающиеся вверх, сливаются с ними, укрупняются. Процесс продолжается до тех пор, пока капли не выпадут из облака в виде дождя.

Особенно эффективно происходит образование осадков, если вершина облака состоит из кристалликов льда. При достижении критических размеров кристаллики льда начинают падать. Процесс конденсации пара на их поверхности в нижних слоях облака протекает гораздо интенсивнее, чем на поверхности капель. В результате из облака выпадает снег, а в некоторых случаях град.

■ Вопросы

1. Как изменяется внутренняя энергия идеального газа при изотермическом процессе?
2. Какая связь между изменением внутренней энергии идеального газа и переданным ему количеством теплоты при изохорном процессе?
3. Как изменяется внутренняя энергия идеального газа при изобарном сжатии?
4. Какой процесс изменения состояния газа называется адиабатным? Как этот процесс может быть осуществлен?
5. Каким способом может быть осуществлен изотермический процесс? Нужен ли при этом теплообмен газа с окружающей средой?
6. Как меняется температура идеального газа при адиабатном процессе?

Задачи для самостоятельного решения

31.1. Идеальный газ с начальным давлением p_1 , занимающий объем V_1 , расширяется до объема V_2 . В каком случае газ совершает большую работу — при изотермическом или адиабатном расширении?

31.2. Поезд массой $2 \cdot 10^3$ т движется со скоростью 72 км/ч. Какое количество теплоты выделится в его тормозных устройствах в процессе торможения поезда до остановки?

31.3. Одноатомный газ в количестве 2 моль находится в цилиндре с подвижным поршнем под атмосферным давлением. В процессе его нагревания температура повысилась от 20 до 70 °C. Какое количество теплоты было передано газу?

31.4. Газ переходит из состояния B в состояние D один раз посредством процесса BCD , другой раз посредством процесса BED (рис. 3.12). Используя данные рисунка, найдите разность количеств теплоты, получаемых телом в ходе обоих процессов.

31.5. Путем изобарного процесса гелий массой 8 г перевели в состояние, в котором объем газа в четыре раза больше первоначального. Определите работу, которую совершил гелий при своем расширении, изменение его внутренней энергии и количество теплоты, сообщенное газу, если его начальная температура 0 °C.

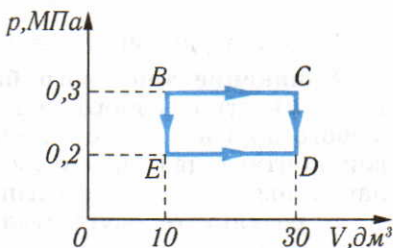


рис. 3.12

§ 32 Теплоемкость газов и твердых тел

Количество теплоты и удельная теплоемкость. Чтобы вычислить изменение внутренней энергии тела в результате теплопередачи, необходимо каким-либо способом измерить количество теплоты, полученное телом. Определение переданного телу количества теплоты основано на измерении температуры. Если работа внешних сил равна нулю ($A' = 0$) и изменение внутренней энергии тела происходит только в результате теплопередачи, то, согласно закону термодинамики, $\Delta U = Q_V$ (изохорный процесс).

Изменение внутренней энергии тела в результате передачи ему количества теплоты можно выразить следующим образом:

$$\Delta U = Q_V = c_V m \Delta T, \quad (32.1)$$

где ΔT — изменение температуры тела; m — масса тела как макроскопическая величина, пропорциональная числу N частиц в нем; c_V — постоянная, называемая *удельной теплоемкостью вещества при постоянном объеме* (зависит от свойств данного вещества и его состояния).

Из этого выражения следует, что удельная теплоемкость при постоянном объеме равна отношению изменения внутренней энергии вещества к массе и изменению его температуры:

$$c_V = \frac{Q_V}{m\Delta T} = \frac{\Delta U}{m\Delta T}. \quad (32.2)$$

Единица удельной теплоемкости — $1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$.

Уравнение теплового баланса. Если известна удельная теплоемкость c_1 одного вещества, то удельную теплоемкость c_2 любого другого вещества легко определить, приведя в тепловой контакт два тела с известными массами и различными начальными температурами в условиях теплоизоляции.

В результате осуществления теплопередачи от горячего тела к холодному в системе устанавливается тепловое равновесие. Согласно закону сохранения энергии, в изолированной системе изменение внутренней энергии одного тела равно по модулю и противоположно по знаку изменению внутренней энергии другого тела, т. е.

$$\Delta U_1 + \Delta U_2 = 0. \quad (32.3)$$

Если изменение внутренней энергии системы происходило только путем теплопередачи ($A=0$), то на основании первого начала термодинамики можно записать: $\Delta U_1 = Q_1$, $\Delta U_2 = Q_2$, $Q_1 + Q_2 = 0$, или $c_1 m_1 \Delta T_1 + c_2 m_2 \Delta T_2 = 0$.

Из этого выражения, называемого *уравнением теплового баланса*, можно выразить удельную теплоемкость вещества c_2 :

$$c_2 = - \frac{c_1 m_1 \Delta T_1}{m_2 \Delta T_2}.$$

Таким образом, зная удельную теплоемкость c_1 одного вещества, можно определить удельную теплоемкость любого другого вещества. Но как определить удельную теплоемкость c_1 выбранного нами эталонного вещества? Для идеального газа расчет можно произвести теоретически. Но для любого реального вещества это можно сделать лишь на основе специального эксперимента.

На тело известной массы m произведем механическое воздействие, приводящее к его нагреванию, и измерим изменение его температуры ΔT . Если механическое воздействие на тело производилось без теплообмена с другими телами, т. е. при условии $Q=0$, то, согласно первому началу термодинамики, изменение внутренней энергии тела ΔU равно работе внешних сил A' (см. 31.6).

Такое же изменение внутренней энергии тела можно вызвать изохорным нагреванием: $\Delta U = Q_V = c_V m \Delta T$. Отсюда для определения удельной теплоемкости c_V получаем выражение

$$c_V = \frac{Q_V}{m\Delta t} = \frac{A'}{m\Delta T}.$$

Следовательно, для определения удельной теплоемкости вещества при постоянном объеме нужно измерить работу, совершенную внешними силами, действующими на тело, и на-

блюдаемое в результате совершения работы изменение температуры тела в условиях отсутствия теплообмена его с другими телами. Такого рода эксперименты были в 1843 г. впервые выполнены Д. Джоулем.

Теплоемкость идеального газа при постоянном объеме. Количество теплоты, передаваемое телу при теплопередаче, не определяет однозначно температуру тела, так как внутренняя энергия тела может изменяться и за счет совершения над ним работы. Поэтому в отличие от такой, например, неизменной характеристики вещества, как молярная масса, удельная теплоемкость зависит от условий, при которых происходит передача тепла.

Рассмотрим случай передачи тепла идеальному газу при условии неизменности занимаемого им объема (изохорный процесс).

Условие передачи тепла газу при постоянном объеме выбрано не случайно. Поскольку работа, совершаемая внешними силами над газом при постоянном объеме, равна нулю, то удельную теплоемкость газа при постоянном объеме можно найти, вычислив изменение внутренней энергии газа массой 1 кг при изменении его температуры на 1 К, используя выражение (32.2).

Внутренняя энергия одноатомного идеального газа равна сумме кинетических энергий тепловых (поступательного) движения молекул и может быть найдена как произведение средней кинетической энергии $\bar{\epsilon}$ теплового движения молекулы на число молекул N :

$$U = \bar{\epsilon}N = 3/2kTN. \quad (32.4)$$

Изменение внутренней энергии идеального газа при увеличении его температуры на ΔT определится выражением

$$\Delta U = 3/2k\Delta TN. \quad (32.5)$$

Из формул (32.2) и (32.5) получаем

$$c_v = \frac{3k\Delta TN}{2m\Delta T} = \frac{3kN}{2m} = \frac{3kN_A}{2M} = \frac{3R}{2M}, \quad (32.6)$$

где M — молярная масса газа.

Для того чтобы проверить применимость полученного результата к реальным газам, вычислим удельные теплоемкости при постоянном объеме для некоторых газов и сравним их с удельными теплоемкостями, полученными экспериментально при температурах около 300 К. Результаты вычислений для водорода, гелия, азота, аргона и углекислого газа приведены в первой строке таблицы 3. Во второй строке этой таблицы приведены удельные теплоемкости тех же газов, полученные экспериментально.

Таблица 3

Формула и наимено- вание	Водород	Гелий	Азот	Аргон	Углекис- лый газ
$c_V = \frac{3R}{2M},$ Дж/(кг · К)	$6,2 \cdot 10^3$	$3,1 \cdot 10^3$	$4,45 \cdot 10^2$	$3,1 \cdot 10^2$	$2,8 \cdot 10^2$
$(c_V)_{\text{эксп}},$ Дж/(кг · К)	$1,01 \cdot 10^4$	$3,2 \cdot 10^3$	$7,5 \cdot 10^2$	$3,2 \cdot 10^2$	$6,5 \cdot 10^2$
$c_V = \frac{iR}{2M},$ Дж/(кг · К)	$1,04 \cdot 10^4$	$3,1 \cdot 10^3$	$7,4 \cdot 10^2$	$3,1 \cdot 10^2$	$5,7 \cdot 10^2$

Сравнение расчетных и экспериментальных значений удельных теплоемкостей газов при постоянном объеме показывает хорошее их согласование для гелия и аргона. Удельные теплоемкости водорода, азота и углекислого газа оказываются в действительности значительно большими, чем предсказывает теория, основанная на применении модели одноатомного идеального газа.

Чем же отличаются гелий и аргон от остальных газов? Существенным отличием от водорода, азота и углекислого газа является то, что это инертные газы. Силы взаимодействия между атомами инертных газов настолько малы, что они при нормальных условиях не соединяются в молекулы. Гелий и аргон — одноатомные газы; водород, азот и углекислый газ — молекулярные газы.

Распределение энергии по степеням свободы. Попробуем уточнить теорию. До сих пор при рассмотрении свойств атомов или молекул газа в расчетах учитывалась лишь их кинетическая энергия поступательного движения, а кинетическая энергия вращательного движения считалась пренебрежимо малой.

Согласие расчетов с экспериментом при вычислении теплоемкостей одноатомных газов показывает, что для них такое предположение справедливо. Поскольку теплоемкости многоатомных газов оказываются большими, чем следует из расчетов при учете только кинетической энергии поступательного движения молекулы, можно предположить, что внутренняя энергия молекулярных газов складывается как из кинетической энергии поступательного движения молекул, так и кинетической энергии их вращательного движения.

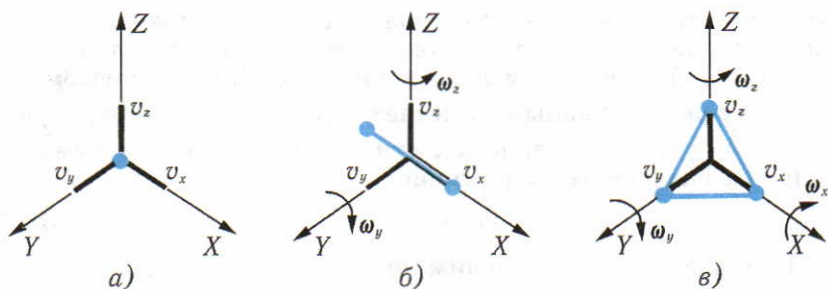


рис. 3.13

В прямоугольной системе координат состояние молекулы задается тремя координатами и тремя проекциями вектора скорости $\vec{v}$ на эти координатные оси: v_x , v_y , v_z (рис. 3.13, а). Степенью свободы тела называется любое независимое движение, которое оно может совершить. Очевидно, что у материальной точки (одноатомные молекулы) в пространстве есть только три степени свободы.

Так как движение молекул газа совершенно хаотично, квадраты проекций скорости на каждую ось в среднем оказываются одинаковыми:

$$v_x^2 = v_y^2 = v_z^2.$$

Отсюда следует, что и кинетическая энергия поступательного движения, приходящаяся на каждую из трех степеней свободы движения, в среднем одинакова. Так как средняя кинетическая энергия поступательного движения молекулы равна $E_k = 3/2 kT$, то кинетическая энергия, приходящаяся на одну степень свободы движения, равна $1/2 kT$.

Теплоемкость многоатомных газов. Двухатомная молекула, кроме трех степеней свободы поступательного движения, обладает еще и двумя степенями свободы вращательного движения, так как может совершать вращение вокруг двух взаимно перпендикулярных осей (OZ , OY).

Вращением двухатомной молекулы вокруг третьей оси, проходящей через центры атомов, можно пренебречь, так как предположение об отсутствии вращения атомов вокруг своих осей подтверждалось в случае вычисления теплоемкости одноатомных газов. Итак, у двухатомной молекулы имеется пять степеней свободы (рис. 3.13, б). Предполагая, что по-прежнему на одну степень свободы приходится кинетическая энергия, равная $1/2 kT$, мы получим, что кинетическая энергия двухатомной молекулы равна:

$$\bar{E}_k = \bar{E}_{\text{пост}} + \bar{E}_{\text{вр}} = 3 \frac{1}{2} kT + 2 \frac{1}{2} kT = \frac{5}{2} kT.$$

Молекулы, состоящие более чем из двух атомов, облада-

ют тремя степенями свободы вращательного движения и тремя степенями свободы для поступательного движения (рис. 3.13, в). Для газа, молекулы которого обладают числом степеней свободы, равным i , кинетическая энергия $\bar{E}_k = \frac{i}{2} kT$. Тогда для удельной теплоемкости при постоянном объеме мы получим следующее выражение:

$$c_V = \frac{i}{2} \cdot \frac{R}{M}. \quad (32.7)$$

Используя его, вычислим удельные теплоемкости двухатомных водорода и азота и трехатомного углекислого газа. Результаты вычислений приведены в третьей строке таблицы 3.

Хорошее согласование теоретических и экспериментальных значений удельных теплоемкостей многоатомных газов доказывает справедливость сделанного предположения о равном распределении энергии по степеням свободы движения. Такое распределение энергии по степеням свободы доказывается в классической молекулярно-кинетической теории и называется законом равнораспределения.

Теплоемкость идеального газа при постоянном давлении. Используя первый закон термодинамики [см. формулу (31.4)], получим

$$c_p = \frac{Q_p}{m\Delta T} = \frac{\Delta U + A}{m\Delta T} = \frac{\Delta U}{m\Delta T} + \frac{A}{m\Delta T} = c_V + \frac{A}{m\Delta T}. \quad (32.8)$$

Работа идеального газа при изобарном расширении определяется выражением

$$A = p\Delta V = \frac{m}{M} R\Delta T.$$

Отсюда для удельной теплоемкости идеального газа при постоянном давлении получаем

$$c_p = c_V + \frac{R}{M}. \quad (32.9)$$

Теплоемкость одного моля вещества называется *молярной теплоемкостью* C :

$$C = Mc.$$

Следовательно, молярные теплоемкости $C_p = c_p M$ и $C_V = c_V M$ связаны уравнением

$$C_p = C_V + R. \quad (32.10)$$

Это уравнение в 1845 г. получил Р. Майер.

Работа при адиабатном процессе. Работа идеального газа на основании первого закона термодинамики при адиабатном расширении равна изменению его внутренней энергии, взятому с противоположным знаком (см. 31.7):

$$A = -\Delta U = mc_V(T_1 - T_2).$$

Для одного моля идеального газа работа равна:

$$A = C_V(T_1 - T_2). \quad (32.11)$$

Из уравнения состояния идеального газа для одного моля выразим температуру:

$$T = \frac{pV}{R}, \text{ или } T = \frac{pV}{(C_p - C_V)}. \quad (32.12)$$

Подставив (32.12) в (32.11), получим выражение для работы газа при адиабатном расширении:

$$A = \frac{C_V(p_1V_1 - p_2V_2)}{C_p - C_V}. \quad (32.13)$$

Отношение теплоемкостей $\gamma = \frac{C_p}{C_V}$ называется *коэффициентом Пуассона*. Его можно выразить через число степеней свободы. В самом деле, удельная теплоемкость при постоянном объеме $c_V = \frac{iR}{2M}$ (см. 32.7), а удельная теплоемкость при постоянном давлении, согласно выражению (32.9), равна:

$$c_p = c_V + \frac{R}{M} = \frac{i}{2} \frac{R}{M} + \frac{R}{M} = \frac{R}{M} \left(\frac{i}{2} + 1 \right) = \frac{i+2}{2} \frac{R}{M}.$$

Тогда для коэффициента Пуассона будем иметь

$$\gamma = \frac{C_p}{C_V} = \frac{i+2}{i}. \quad (32.14)$$

У одноатомного газа $i=3$, следовательно, $\gamma = \frac{3+2}{3} = \frac{5}{3} = 1,67$.

У двухатомного газа $i=5$, следовательно, $\gamma = \frac{5+2}{5} = \frac{7}{5} = 1,4$.

Разделив числитель и знаменатель выражения (32.13) на c_V , получим окончательно для работы при адиабатном расширении газа:

$$A = \frac{p_1V_1 - p_2V_2}{\gamma - 1}. \quad (32.15)$$

Уравнение Пуассона. Как известно, соотношение между давлением и объемом идеального газа при изотермическом процессе выражается законом Бойля — Мариотта $pV = \text{const}$. Графиком этого процесса в осях p, V является гипербола. Каким же соотношением связаны давление и объем газа при адиабатном процессе?

Мы не будем выводить искомое соотношение, а запишем его в готовом виде:

$$pV^\gamma = \text{const}. \quad (32.16)$$

Это выражение называется уравнением адиабаты или *уравнением Пуассона*. График адиабаты показан на рисунке 3.9.

Используя уравнение состояния идеального газа, можно уравнение адиабаты записать еще в двух видах:

$$TV^{\gamma-1} = \text{const}, \quad (32.17)$$

$$\frac{p^{\gamma-1}}{T^{\gamma}} = \text{const}. \quad (32.18)$$

Предлагаем читателю получить эти соотношения самостоятельно.

Теплоемкость твердых тел. Тепловое движение частиц, из которых состоят кристаллы, в основном сводится к колебаниям частиц около положения равновесия. В твердом теле в отличие от газов велика потенциальная энергия взаимодействия атомов и молекул. Как и у тела, совершающего гармонические колебания под действием сил упругости, средние значения изменений кинетической и потенциальной энергий частицы в твердом теле одинаковы. На одну степень свободы колебательного движения приходится энергия, в 2 раза большая, чем на одну степень свободы поступательного движения, т. е. $2(1/2kT) = kT$. Полная энергия колебательного движения одного атома равна $\bar{E}_{\text{кол}} = 3kT$. Следовательно, изменение внутренней энергии одноатомного твердого тела при изменении его температуры равно:

$$\Delta U = 3k\Delta TN, \quad (32.19)$$

где N — число атомов.

Пренебрегая работой при измерении объема твердого тела, можно считать, что удельная теплоемкость вещества в твердом состоянии:

$$c_p = \frac{Q_p}{m\Delta T} = \frac{\Delta U}{m\Delta T} = \frac{3k\Delta TN}{m\Delta T} = \frac{3kN}{m} = \frac{3R}{M}. \quad (32.20)$$

Молярная теплоемкость вещества в твердом состоянии равна:

$$C = cM = 3R. \quad (32.21)$$

Этот вывод, сделанный на основе предположения о справедливости для твердых тел закона равномерного распределения энергии по степеням свободы, подтверждается результатами, полученными экспериментально для многих веществ в твердом состоянии, в частности для металлов. Приблизительное равенство молярных теплоемкостей различных элементов в твердом состоянии было установлено на основании опытов в 1819 г. французскими физиками П. Дюлонгом и А. Пти (закон Дюлонга — Пти).

Рассмотренная нами классическая теория теплоемкости твердых тел является очень грубым приближением к действительности. Основные особенности поведения твердых тел в процессах теплопередачи объясняет квантовая теория строения вещества.

Вопросы

1. Как можно определить удельную теплоемкость вещества, не сравнивая ее с удельными теплоемкостями каких-либо других веществ? 2. Почему удельные теплоемкости одноатомных и многоатомных газов не совпадают? 3. Почему теплоемкости химических элементов в кристаллическом состоянии вдвое больше теплоемкости одноатомных газов? 4. Какие тепловые свойства веществ не могла объяснить классическая молекулярно-кинетическая теория?

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1. Одним из способов получения высоких температур является адиабатное сжатие газов. Для этого можно воспользоваться, например, толстостенным цилиндром, закрытым с обеих сторон, с перемещающимся в нем поршнем. По одну сторону от поршня помещается пороховой заряд, а по другую — газ. При взрыве пороха поршень «выстреливается» и производит адиабатное сжатие газа в цилиндре. Вычислите максимальную температуру сжатого водорода массой 2 г, если пороховой заряд сообщает поршню массой 1 кг начальную скорость 1 км/с.

$$\begin{aligned} m &= 1 \text{ кг} \\ m_r &= 2 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \\ M &= 2 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль} \\ v &= 10^3 \text{ м/с} \\ \Delta T &= ? \end{aligned}$$

Решение

$$\begin{aligned} \Delta U &= A + Q; A = mv^2/2; Q = 0; \Delta U = A; \\ \Delta U &= m_1 c_1 \Delta T; c_1 = iR/2M = 5R/2M; \\ m_r (5R/2M) \Delta T &= mv^2/2. \\ \Delta T &= \frac{Mmv^2}{5m_r R} = \frac{2 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 10^6}{5 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 8,31} \text{ К} = 2,4 \cdot 10^4 \text{ К}. \end{aligned}$$

Полученный результат представляет собой лишь оценку изменения температуры водорода, так как в расчетах не учитывались такие явления, как распад молекул и ионизация атомов водорода при высоких температурах.

Задача 2. Чему равна молярная теплоемкость идеального газа в процессе, в котором давление пропорционально объему газа: $p = \alpha V$, если молярная теплоемкость газа при постоянном объеме равна C_1 ?

Решение. В соответствии с первым законом термодинамики

$$\Delta Q = \Delta U + A = C_1 \Delta T + A.$$

Работу A , совершаемую молекул газа при расширении по закону $p = \alpha V$, можно рассчитать по формуле

$$A = p_{\text{ср}} \Delta V = \frac{p_1 + p_2}{2} (V_2 - V_1) = \frac{\alpha (V_1 + V_2)}{2} (V_2 - V_1) = \frac{\alpha (V_2^2 - V_1^2)}{2}.$$

Этот же результат легко найти, рассчитав площадь под графиком $p = \alpha V$ в координатах p, V .

Используя уравнение Клапейрона — Менделеева $pV = RT$ с учетом условия задачи ($p = \alpha V$), получим

$$\alpha V^2 = RT.$$

Подставив полученный результат в выражение для работы газа, будем иметь

$$A = R/2 (T_2 - T_1) = R\Delta T/2.$$

Отсюда молярная теплоемкость газа при данном процессе оказывается равной:

$$C = \Delta Q / \Delta T = (C_1 \Delta T + R\Delta T/2) / \Delta T = C_1 + R/2.$$

■ Задачи для самостоятельного решения

32.1. В вертикальном цилиндре высотой $h_1 = 2$ м с теплоизолированными стенками находится гелий массой $m_{\text{He}} = 0,32$ г при температуре $T_1 = 27^\circ\text{C}$. На какой высоте окончательно установится поршень массой $m = 40$ кг, опущенный сверху и движущийся в цилиндре без трения, если над поршнем вакуум?

32.2. В цилиндре с поршнем находится некоторое количество гелия. К газу подвели количество теплоты, равное 14 кДж. На сколько изменится внутренняя энергия газа? Какова работа расширения? Процесс происходит изобарно.

32.3. Решите предыдущую задачу при условии, что в цилиндре находится водород.

32.4. В цилиндре с поршнем находится неон. При начальном давлении 0,2 МПа его объем равен $0,4$ м³. Найдите давление газа, если его объем адиабатно увеличился в три раза.

32.5. Какова должна быть степень сжатия воздуха, чтобы его температура возросла с 20 до 800 °С? Сжатие считать адиабатным. Воздух считать двухатомным газом.

32.6. Найдите удельную теплоемкость водорода, гелия и кислорода при постоянном давлении. Сравните с табличными данными.

32.7. Найдите удельную теплоемкость серы, железа, меди, ртути и алюминия. Сравните с табличными данными (при температурах от 20 до 100 °С).

32.8. Удельная теплоемкость алмаза при 20 °С равна 0,5 кДж/(кг·К), графита при 100 °С — 0,934 кДж/(кг·К), а при 1000 °С — 1,7 кДж/(кг·К). Соответствуют ли эти значения закону Дюлонга — Пти?

§ 33 Принцип действия тепловой машины

Основные части теплового двигателя. В современной технике механическую энергию получают главным образом за счет внутренней энергии топлива. Устройства, в которых происходит преобразование внутренней энергии в механическую, называют *тепловыми двигателями*.

Для совершения работы за счет сжигания топлива в устройстве, называемом *нагревателем*, можно воспользоваться цилиндром, в котором нагревается и расширяется газ и перемещает поршень. Газ, расширение которого вызывает перемещение поршня, называют *рабочим телом*. Расширяется же газ потому, что его давление выше внешнего давления. Но при расширении газа его давление падает, и рано или поздно оно станет равным внешнему давлению. Тогда расширение газа закончится, и он перестанет совершать работу.

Как же следует поступить, чтобы работа теплового двигателя не прекращалась? Для того чтобы двигатель работал непрерывно, необходимо, чтобы поршень после расширения газа возвращался каждый раз в исходное положение, сжимая газ до первоначального состояния. Сжатие же газа может происходить только под действием внешней силы, которая при этом совершает работу (сила давления газа в этом случае совершает отрицательную работу). После этого вновь могут происходить процессы расширения и сжатия газа. Значит, работа теплового двигателя должна состоять из периодически повторяющихся процессов (циклов) расширения и сжатия.

В качестве примера рассмотрим принцип работы поршневого теплового двигателя, не останавливаясь подробно на его устройстве. В таком двигателе газ (рабочее тело) давит на поршень, который перемещается в цилиндре, как, например, в автомобильном двигателе. Для простоты рассуждений будем считать, что в двигателе используется все время одна и та же порция газа.

Когда газ расширяется, он движет поршень. Движение поршня передается валу двигателя с сидящим на нем маховиком. Для сжатия газа поршень должен переместиться под действием внешней силы в противоположном направлении. Это движение совершается за счет кинетической энергии, запасенной маховиком в процессе расширения газа.

Если работа, совершаемая при сжатии газа под действием внешней силы, по абсолютному значению равна работе, совершаемой при его расширении, то общая работа за цикл равна нулю. Отсюда следует, что если мы хотим получить полезную работу, то необходимо сделать работу сжатия газа меньше работы расширения.

Для того же, чтобы работа при сжатии была по абсолютному значению меньше работы расширения, нужно, чтобы каждому значению объема при сжатии соответствовало меньшее давление, чем при расширении. Давление газа при одном и том же объеме тем меньше, чем ниже его температура. Поэтому газ перед сжатием должен быть охлажден. Для этого его необходимо привести в контакт с телом, имеющим более низкую температуру. Это тело называется *холодильником*.

Нагреватель, рабочее тело и холодильник — основные части теплового двигателя.

На рисунке 3.14 изображены графически процессы расширения газа (линия AB) и сжатия до первоначального объема (линия CD). Работа газа в процессе расширения положительна ($\Delta V > 0$) и численно равна площади фигуры $ABEF$. Работа газа при сжатии отрицательна (так как $\Delta V < 0$) и численно равна площади фигуры $CDEF$. Полезная работа за

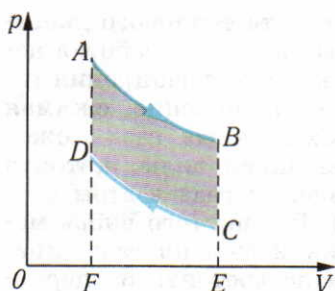


рис. 3.14

этот цикл численно равна разности площадей под кривыми AB и CD (закрашена на рисунке).

Таким образом, мы выяснили, что для получения при циклическом процессе полезной механической работы расширение газа (рабочего тела) должно происходить при более высокой температуре, чем сжатие, т. е. от нагревателя газ должен получить количество теплоты Q_1 , которое больше ко-

личества теплоты Q_2 , отданного холодильнику при сжатии. Наличие нагревателя, рабочего тела и холодильника принципиально необходимое условие для непрерывной циклической работы любого теплового двигателя.

Коэффициент полезного действия тепловой машины. Рабочее тело, получая некоторое количество теплоты Q_1 от нагревателя, часть этого количества теплоты, по модулю равную $|Q_2|$, отдает холодильнику¹. Поэтому совершаемая работа не может быть больше $A = Q_1 - |Q_2|$. Отношение этой работы к количеству теплоты, полученному расширяющимся газом от нагревателя, называется *коэффициентом полезного действия* η тепловой машины:

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1}. \quad (33.1)$$

Коэффициент полезного действия тепловой машины, работающей по замкнутому циклу, всегда меньше единицы. Задача теплотехники состоит в том, чтобы сделать КПД как можно более высоким, т. е. использовать для получения работы как можно большую часть теплоты, полученной от нагревателя. Как этого можно достигнуть?

Тепловая машина с наибольшим КПД. При расширении или сжатии газа должны быть использованы процессы, позволяющие исключить уменьшение энергии горячего тела, которое происходило бы без совершения работы. Такие процессы существуют — это изотермический и адиабатный процессы.

Впервые наиболее совершенный циклический процесс, состоящий из изотерм и адиабат, был предложен французским физиком и инженером С. Карно в 1824 г.

Сад Карно искал пути решения актуальной для его времени задачи — установить причину несовершенства тепловых машин, найти пути наиболее эффективного их использования. Его труды — яркий в истории физики пример взаимного влияния науки и техники.

¹ Напомним, что количество теплоты, отданное телом, является величиной отрицательной, т. е. $Q_2 < 0$.

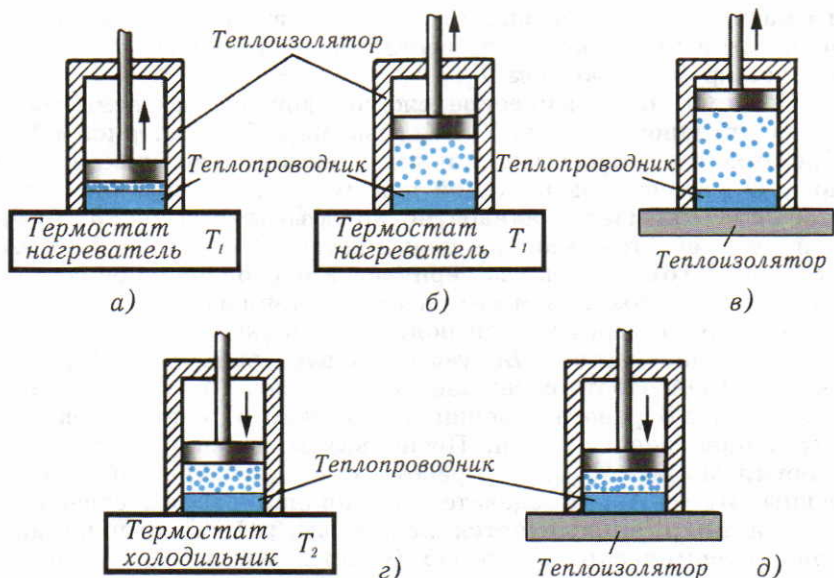


рис. 3.15

Цикл Карно. Допустим, что газ находится в цилиндре, стенки и поршень которого сделаны из теплоизоляционного материала, а дно — из материала с высокой теплопроводностью. Объем, занимаемый газом, равен V_1 .

Приведем цилиндр в контакт с нагревателем (рис. 3.15, а) и предоставим газу возможность изотермически расширяться и совершать работу (рис. 3.15, б). Газ получает при этом от нагревателя некоторое количество теплоты Q_1 . Этот процесс графически изображается изотермой (кривая AB , рис. 3.16).

Когда объем газа становится равным некоторому значению $V'_1 < V_2$, дно цилиндра изолируют от нагревателя (рис. 3.15, в), после этого газ расширяется адиабатно до объема V_2 , соответствующего максимально возможному ходу поршня в цилиндре (адиабата BC , см. рис. 3.16). При этом газ охлаждается до температуры $T_2 < T_1$.

Теперь охлажденный газ можно изотермически сжимать при температуре T_2 . Для этого его нужно привести в контакт с телом, имеющим ту же температуру T_2 , т. е. с холодильником (рис. 3.15, г),

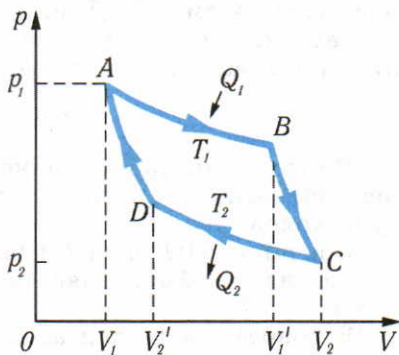


рис. 3.16

и сжать газ внешней силой. Однако в этом процессе газ не вернется в первоначальное состояние — температура его будет все время ниже чем T_1 .

Поэтому изотермическое сжатие доводят до некоторого промежуточного объема $V_2' > V_1$ (изотерма CD , см. рис. 3.16). При этом газ отдает холодильнику некоторое количество теплоты Q_2 , равное совершаемой над ним работе сжатия. После этого газ сжимается адиабатно до объема V_1 (рис. 3.15, ∂), при этом его температура повышается до T_1 (адиабата DA , см. рис. 3.16). Теперь газ вернулся в первоначальное состояние, при котором объем его равен V_1 , температура — T_1 , давление — p_1 , и цикл можно повторить вновь.

Итак, на участке ABC газ совершает работу ($A > 0$), а на участке CDA работа совершается над газом ($A < 0$). На участках BC и AD работа совершается только за счет изменения внутренней энергии газа. Поскольку изменение внутренней энергии $\Delta U_{BC} = -\Delta U_{DA}$, то и работы при адиабатных процессах равны: $A_{BC} = -A_{DA}$. Следовательно, полная работа, совершаемая за цикл, определяется разностью работ, совершаемых при изотермических процессах (участки AB и CD). Численно эта работа равна площади фигуры, ограниченной кривой цикла $ABCD$ (см. рис. 3.16).

В полезную работу фактически преобразуется только часть количества теплоты Q_T , полученной от нагревателя, равная $Q_{T_1} - |Q_{T_2}|$. Итак, в цикле Карно полезная работа $A = Q_{T_1} - |Q_{T_2}|$.

Максимальный коэффициент полезного действия идеального цикла, как показал С. Карно, может быть выражен через температуру нагревателя (T_1) и холодильника (T_2):

$$\eta_{\text{ид}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}. \quad (33.2)$$

В реальных двигателях не удастся осуществить цикл, состоящий из идеальных изотермических и адиабатных процессов. Поэтому КПД цикла, осуществляемого в реальных двигателях, всегда меньше, чем КПД цикла Карно (при одних и тех же температурах нагревателей и холодильников):

$$\eta < \eta_{\text{ид}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}. \quad (33.3)$$

Из формулы (33.2) видно, что КПД двигателей тем больше, чем выше температура нагревателя и чем ниже температура холодильника.

Конечно, КПД был бы равен 100%, если бы температура холодильника была равна абсолютному нулю. Но это невозможно.

В современных двигателях обычно КПД увеличивают за счет повышения температуры нагревателя. В мощных паровых турбинах в настоящее время используют пар, темпера-

тура которого достигает 600°C . В газовых турбинах температура газа достигает 900°C . Дальнейшее повышение температуры нагревателя ограничивается отсутствием достаточно жаростойких материалов. Холодильниками этих двигателей служит атмосфера с температурой порядка 20°C . Вычисленный по формуле (33.2) КПД тепловых машин при указанных температурах нагревателя и холодильника должен был бы достигать 66—75%, реальный же КПД этих двигателей равен 30—35%.

■ ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1. В цилиндре тепловой машины находится 1 моль одноатомного идеального газа. Определите КПД тепловой машины, если изменение состояния газа в цилиндре осуществляется по циклу, показанному на рисунке 3.17.

Решение

$$\eta = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1} = \frac{A}{Q_1}; \quad Q_1 = Q_{AB} + Q_{BC} = mc_V(T_B - T_A) + mc_V(T_C - T_B) + 2p_0V_0,$$
 так как $Q_{AB} = \Delta U_1$, $Q_{BC} = \Delta U_2 + A_1$, $A_1 = 2p_0V_0$, $A = p_0V_0$ (площадь внутри синего прямоугольника).

$$\text{Тогда } \eta = \frac{p_0V_0}{mc_V(T_C - T_A) + 2p_0V_0}.$$

Из уравнения Клапейрона — Менделеева для состояний А и В получим

$$\frac{p_A V_A}{T_A} = \frac{p_B V_B}{T_B}, \text{ или } \frac{p_0 V_0}{T_A} = \frac{2p_0 V_0}{T_B}.$$

Отсюда $T_B = 2T_A$.

Для состояний С и В аналогично получим

$$\frac{p_B V_B}{T_B} = \frac{p_C V_C}{T_C}; \quad \frac{2p_0 V_0}{T_B} = \frac{2p_0 2V_0}{T_C}; \quad T_C = 2T_B = 4T_A.$$

Обозначив $T_A = T_0$, подставим найденные значения T_B и T_C в выражение для КПД:

$$\eta = \frac{p_0 V_0}{mc_V(4T_0 - T_0) + 2p_0 V_0}.$$

Так как $\nu = 1$ моль, $C_V = \frac{3}{2} \frac{R}{M}$, то $p_0 V_0 = RT_0$, поэтому

$$\eta = \frac{p_0 V_0}{m \frac{3}{2} \frac{R}{M} 3T_0 + 2p_0 V_0} = \frac{p_0 V_0}{\frac{9}{2} p_0 V_0 + 2p_0 V_0} = \frac{2p_0 V_0}{13p_0 V_0} \approx 0,15.$$

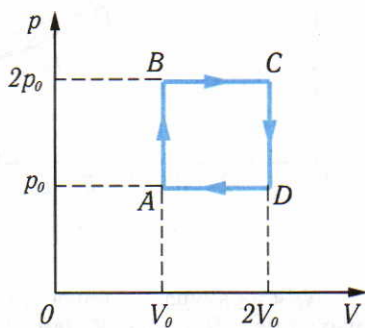


рис. 3.17

Задача 2. На рисунке 3.18 представлены диаграммы двух циклов Карно: $ABCD$ и $ABC'D'$. При работе по какому из этих циклов тепловая машина обладает большим КПД?

Решение. КПД идеальной тепловой машины определяется выражением

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

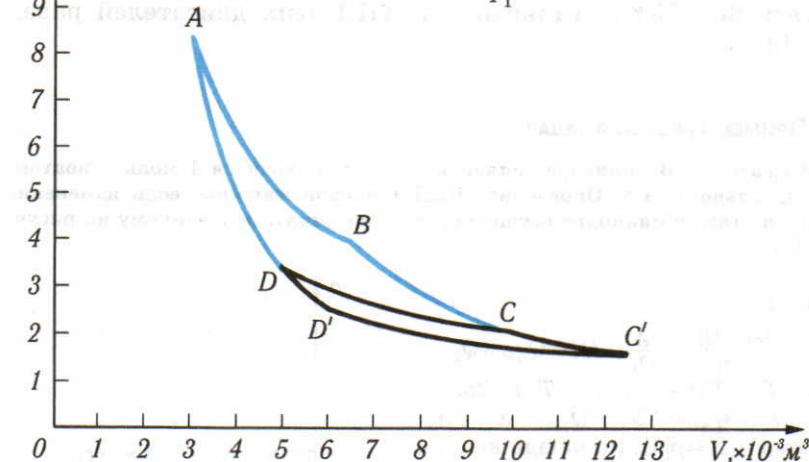


рис. 3.18

Температура T_1 нагревателя в двух циклах одинакова, так как изотерма AB у них общая. Температура холодильника T_2 при работе по циклу $ABC'D'$ ниже, так как адиабатное расширение газа происходит до большего объема. Следовательно, КПД при работе по циклу $ABC'D'$ выше, чем при работе по циклу $ABCD$. Это непосредственно видно и из сравнения площадей обоих циклов.

Задачи для самостоятельного решения

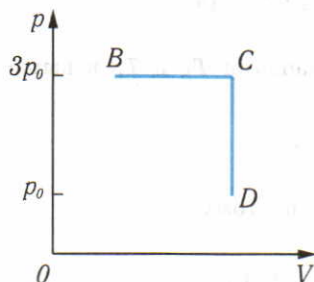


рис. 3.19

33.1. При переходе одного моля идеального газа из состояния B с температурой T в состояние D с той же температурой газ совершил работу 8300 Дж (рис. 3.19). Определите температуру газа в состояниях B , C и D .

33.2. В идеальной тепловой машине газ отдал холодильнику 55% количества теплоты, полученное от нагревателя. Определите температуру холодильника, если температура нагревателя 327°C .

§ 34 Необратимость тепловых процессов

Необратимые и обратимые процессы. Ограничения, накладываемые на полное использование внутренней энергии при совершении механической работы тепловыми двигателями, не вытекают из первого закона термодинамики. Этот закон «запрещает» лишь получение большей работы, чем было затрачено энергии, т. е. исключает возможность создания так называемого вечного двигателя первого рода. Но если бы энергия нагревателя уменьшилась, например, на 100 Дж и при этом была бы совершена работа 100 Дж, то это не противоречило бы первому закону термодинамики. Однако циклический процесс, при котором все количество теплоты, полученное от нагревателя, шло бы на совершение работы, невозможен. Неизбежно некоторая часть этого количества теплоты отдается другим телам с более низкой температурой.

Значит, возможны не все процессы, находящиеся в согласии с первым законом термодинамики. В самом деле, представим себе, что в калориметр с холодной водой опустили горячее тело. Если бы при этом холодная вода остыла и некоторое количество теплоты передала горячему телу, которое бы при этом еще больше нагрелось, то такое явление не противоречило бы первому закону термодинамики: баланс энергии был бы соблюден. Но такой процесс в природе никогда не происходит.

Самопроизвольно происходящие процессы теплообмена между телами всегда протекают так, что горячее тело охлаждается, передавая энергию менее нагретому телу, температура которого повышается. Обратный этому процесс самопроизвольно никогда не происходит. (*Самопроизвольными* процессами называют такие процессы, которые происходят без воздействия внешних тел, а значит, без изменений в этих телах.)

Процесс теплообмена происходит до тех пор, пока температуры тел не сравняются — в системе тел устанавливается тепловое равновесие.

Рассмотрим еще один процесс, обратный которому самопроизвольно не протекает. Сжатый газ, находящийся в цилиндре с подвижным поршнем, расширяется до тех пор, пока его давление не станет равно внешнему давлению. Но никогда не наблюдается самопроизвольное сжатие газа. Благодаря хаотическому движению молекул газ всегда занимает весь предоставленный ему объем. Сжать газ можно, только действуя на него внешней силой. При этом в окружающих телах произойдут изменения: тело, которое сжимает газ, совершает работу, а следовательно, оно теряет некоторую энергию.

Процессы, обратные которым самопроизвольно не происходят, называют *необратимыми*.

Процессы перехода системы из одного состояния в другое, которые можно провести в обратном направлении через ту же последовательность промежуточных равновесных состояний, называются *обратимыми*. При этом сама система и окружающие тела полностью возвращаются к исходному состоянию.

Механические движения, происходящие без трения, обратимы, т. е. обратимыми являются механические процессы в консервативных системах. Реальные же процессы в природе, протекающие с трением, необратимы. Например, колебания маятника при наличии трения затухают, и маятник останавливается. В этом случае механическая энергия маятника убывает, а температура маятника и окружающей среды повышается, т. е. увеличивается внутренняя энергия этих тел. Процесс превращения механической энергии во внутреннюю энергию необратим.

Почему процессы в природе необратимы? Чтобы ответить на этот вопрос, вспомним, что тела состоят из огромного числа частиц, находящихся в непрерывном хаотическом движении. Возьмем для примера самую простую систему — идеальный газ. Пусть в начале опыта газ находится в одной из половин сосуда, а в другой половине создан вакуум. Если убрать заслонку, то газ займет весь объем сосуда (рис. 3.20), и его плотность станет по всему объему одинаковой. Одинаковыми станут также давление и температура газа во всех участках сосуда. Система перейдет в равновесное состояние. После этого макроскопические параметры системы больше не будут изменяться, хотя молекулы газа будут двигаться по всему объему сосуда, меняя свои скорости при соударении со стенками сосуда и друг с другом.

Практически нам не удастся обнаружить состояние, при котором все молекулы газа собирались бы вновь в одной половине сосуда. Это и говорит о том, что расширение газа в пустоту — процесс необратимый. Разумеется, самопроизвольно, под действием внешней силы, молекулы газа могут собраться в одной половине сосуда. Например, если бы вместо правой стенки сосуда был бы поршень, то, переместив его, можно было бы собрать газ в левой половине сосуда. Почему же не наблюдаются состояния, когда все молекулы газа самопроизвольно оказываются в одной половине сосуда?

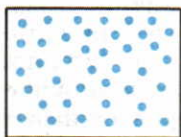


рис. 3.20

Все дело в том, что газ состоит из огромного числа молекул. Рассмотрим, что было бы, если бы частиц было немного. Как они могли бы распределяться между половинами сосуда?

Если в сосуде одна молекула, то число раз-

личных способов ее распределения между половинами сосуда $N=2$ — она находится либо в одной, либо в другой половине сосуда. Из этих двух возможностей, например, нахождению частицы в левой половине сосуда соответствует один способ. Вероятность найти молекулу в любой половине сосуда, очевидно, равна $1/2$, т. е. 50%.

В случае двух частиц ($n=2$) общее число возможных распределений между частями сосуда $N=4=2^2$. Но существует только один случай, когда все частицы находятся в левой части сосуда, и два случая ($K=2$), когда частицы распределены поровну между частями сосуда.

Для 10 частиц ($n=10$) общее число возможных распределений $N=1024=2^{10}$. Но есть только один из способов, когда все частицы размещены в одной половине сосуда, и 252 способа, когда они распределены равномерно по обеим половинам сосуда.

Обобщая рассмотренные случаи для любого числа частиц n , можно сказать, что общее число возможных размещений частиц между двумя половинами сосуда равно $N=2^n$. И только один случай из этого числа соответствует распределению частиц, при котором все они будут в одной половине сосуда. Число же способов, при котором частицы распределены по объему равномерно, растет с увеличением числа частиц, и тем быстрее, чем их больше.

Необратимость и вероятность. Вероятность какого-либо случайного события определяется как отношение числа случаев K , соответствующих наступлению ожидаемого события, к общему числу возможных случаев N , если все случаи равновозможны:

$$P = \frac{K}{N}. \quad (34.1)$$

Число молекул газа, содержащихся, например, в одном моле вещества, огромно, оно равно примерно $6 \cdot 10^{23}$. В этом случае число возможных размещений молекул по обеим половинам сосуда $N=2^n=2^{6 \cdot 10^{23}}$. Это невообразимо большое число. И только в одном из этих случаев все молекулы снова соберутся в левой части сосуда. Значит, вероятность такого события равна:

$$P_0 = \frac{1}{N} = \frac{1}{2^{6 \cdot 10^{23}}} \approx 0.$$

Совершенно очевидно, что такое событие настолько маловероятно, что можно считать его практически невозможным.

Наибольшее число случаев из $N=2^{6 \cdot 10^{23}}$ соответствует равномерному или очень близкому к равномерному распределению молекул по всему объему сосуда. Поэтому вероятность такого события максимальна и практически именно оно всегда наблюдается в эксперименте. Значит, равномерное распределение мо-

лекул в сосуде является наиболее вероятным состоянием. Вот почему газ самопроизвольно практически никогда не собирается в одной половине сосуда, так как это был бы самопроизвольный переход от более вероятного состояния к состоянию, вероятность которого ничтожно мала.

Малой вероятностью события объясняются и другие необратимые процессы. Например, диффузия необратима потому, что процесс полного разделения образовавшейся смеси различных частиц по разным частям сосуда осуществляется лишь одним способом из огромного числа возможных распределений.

Второй закон термодинамики. В § 33 мы выяснили, что существуют определенные ограничения на полное использование внутренней энергии нагревателя для совершения работы в циклических тепловых двигателях. Главная особенность циклического теплового двигателя состоит в том, что рабочее тело в нем, получая некоторое количество теплоты от нагревателя и производя работу, обязательно отдает часть этой теплоты холодильнику.

Значит, количество теплоты, полученное от нагревателя, не может быть целиком преобразовано в механическую работу циклически действующей тепловой машиной. Это утверждение представляет собой важный закон природы, получивший название *второго закона термодинамики*. Он формулируется следующим образом: в циклически действующей тепловой машине невозможен процесс, единственным результатом которого было бы преобразование в механическую работу всего количества теплоты, полученного от источника энергии — нагревателя.

Именно так этот закон впервые был сформулирован У. Кельвином в 1851 г.

Второй закон термодинамики непосредственно связан с необратимостью процессов в природе.

В самом деле, если бы количество теплоты Q_2 самопроизвольно могло бы переходить обратно от холодильника к нагревателю, то работа совершалась бы за счет всего количества теплоты Q_1 , полученного от нагревателя. Однако количество теплоты от холодного тела к горячему самопроизвольно никогда не переходит. Значит, невозможность получения работы за счет всего количества теплоты, полученного от нагревателя, связана с необратимостью тепловых процессов. В связи с этим возможна другая формулировка *второго закона термодинамики*, данная Р. Клаузиусом: невозможен процесс, единственным результатом которого была бы передача энергии от холодного тела к горячему.

Разумеется, совершая работу за счет внешнего источника энергии, можно отбирать энергию у холодного тела и передавать ее горячему. Это, например, происходит в холодильниках,

где такой процесс совершается за счет работы двигателя, потребляющего электрическую энергию.

Второй закон термодинамики имеет вероятностный характер. В отличие от закона сохранения энергии, который может быть применен к отдельным частицам (молекулам, атомам), второй закон термодинамики применим лишь к системам, состоящим из очень большого числа частиц. Для таких систем необратимость процессов объясняется тем, что обратный переход должен был бы привести систему в состояние с ничтожно малой вероятностью, практически неотличимой от невозможности.

Самопроизвольные процессы в изолированной системе всегда происходят в направлении перехода от маловероятного состояния в более вероятное.

Второй закон термодинамики позволяет понять, почему некоторые источники энергии, находящиеся вокруг нас, бесполезны. Заманчивым кажется использование почти безграничного запаса внутренней энергии, содержащейся в атмосфере и в водах океанов. Нетрудно оценить, каким огромным запасом внутренней энергии обладает окружающая Землю атмосфера, масса которой равна примерно 10^{18} кг. Еще большим запасом внутренней энергии обладают моря и океаны. Масса воды в Мировом океане составляет около 10^{21} кг. Охлаждение ее только на один градус привело бы к выделению энергии порядка 10^{24} Дж. Это в 10 000 раз больше всей энергии, вырабатываемой на земном шаре за год.

Казалось бы, энергетические запасы на земном шаре почти безграничны. Однако внутреннюю энергию морей и океанов не причисляют к энергетическим запасам. Ведь для получения работы за счет этой энергии необходимо иметь столь же гигантский холодильник, который принимал бы часть этого огромного количества теплоты и при этом не нагревался сам до температуры океана.

Двигатель, который мог бы совершать работу только за счет источника энергии без холодильника, получил название «вечного двигателя второго рода», так как он мог бы работать непрерывно за счет почти безграничных запасов энергии. Создание «вечного двигателя второго рода» противоречит второму закону термодинамики.

В последнее время появились проекты получения механической энергии за счет использования разности температур между глубинными и поверхностными слоями морей и океанов. Эти проекты связаны с огромными техническими трудностями, но не противоречат законам термодинамики.

Почему необходимо экономное расходование энергии? Второй закон термодинамики помогает понять сущность энергетической проблемы, стоящей перед человечеством.

Как известно, первый закон термодинамики утверждает, что энергия изолированной системы сохраняется. «...Природа как целое содержит определенный запас энергии, который не может быть ни уменьшен, ни увеличен, и что поэтому количество энергии в природе вечно и неизменно...» — писал Гельмгольц, который был одним из первых физиков XIX в., сформулировавших закон сохранения энергии.

Казалось бы, этот закон не дает оснований беспокоиться о запасах в природе энергии и ее экономии. Энергетические ресурсы планеты — это главным образом та внутренняя энергия, которая содержится в топливе. Она составляет более 80% всех энергетических запасов земли. Эта энергия используется для обогрева помещений, в ряде технологических процессов, в различных тепловых машинах.

Несмотря на существование закона сохранения энергии, необходимо экономное расходование энергии, ведь запасы топлива в природе ограничены и минеральное топливо (нефть, уголь, газ) невозобновляемо.

■ Вопросы

1. Что такое вероятность случайного события? 2. Какие процессы являются необратимыми? 3. Как связаны между собой необратимость и вероятность? 4. В чем смысл второго закона термодинамики?

§ 35 Устройство и действие тепловых машин

Тепловые машины и развитие техники. Развитие энергетики является одной из важнейших предпосылок научно-технического прогресса. Мощный расцвет промышленности и транспорта в XIX в. был связан с изобретением и усовершенствованием первого теплового двигателя — паровой машины. Создание паровых, а затем газовых турбин и двигателей внутреннего сгорания полностью преобразовало всю энергетику, позволило создать крупные морские суда, автомобильный и воздушный транспорт, космические ракеты, построить тепловые электростанции и на этой основе реорганизовать всю промышленность.

Впервые практически действующие универсальные паровые машины были созданы И. И. Ползуновым (1763) и Д. Уаттом (1764).

Конструкция первых паровых машин имела основные части всех последующих тепловых машин: нагреватель, в котором освобождалась энергия топлива; водяной пар как рабочее тело и поршень с цилиндром, преобразующий внутреннюю энергию пара в механическую энергию; охладитель, необходимый для снижения температуры и давления пара.

Главным недостатком паровых машин был низкий КПД, не превышающий 9%.

Поршневой двигатель внутреннего сгорания. Среди способов увеличения КПД тепловых двигателей один оказался особенно перспективным. Сущность его состояла в уменьшении потерь теплоты за счет перенесения места сжигания топлива и нагревания рабочего тела внутрь цилиндра. Отсюда и происхождение названия «двигатель внутреннего сгорания» (ДВС). Естественно, что для двигателей внутреннего сгорания наиболее удобным топливом является газообразное или жидкое.

Первый двигатель внутреннего сгорания был создан в 1860 г. французским инженером Э. Ленуаром. Этот двигатель не имел трубы, топки и котла. Вместо пара в цилиндр при движении поршня засасывалась смесь светильного газа и воздуха. Когда поршень проходил расстояние, равное половине своего хода, закрывался впускной клапан и горючая смесь воспламенялась электрической искрой. Под давлением продуктов сгорания поршень двигался дальше, совершая рабочий ход. В конце рабочего хода открывался выпускной клапан, и поршень при обратном ходе выталкивал продукты сгорания из цилиндра.

В 1862 г. французским инженером Бодэ Роша было предложено использовать в двигателе внутреннего сгорания четырехтактный цикл: всасывание, сжатие, горение и расширение, выхлоп. Эта идея была использована немецким изобретателем Н. Отто, построившим в 1878 г. первый четырехтактный газовый двигатель внутреннего сгорания. КПД этого двигателя достигал 22%, что превышало значения, полученные при использовании двигателей всех предшествующих типов.

Карбюраторный двигатель. Развитие нефтяной промышленности в конце XIX в. дало новые виды топлива — керосин, бензин. В бензиновом двигателе для более полного сгорания топлива перед впуском в цилиндр его смешивают с воздухом в специальных смесителях, называемых карбюраторами. Воздушно-бензиновую смесь называют горючей смесью.

Расчеты показывают, что для полного сгорания смеси на единицу массы бензина должно приходиться не менее 15 единиц массы воздуха. Это означает, что рабочим телом в двигателях внутреннего сгорания фактически является воздух, а не пары бензина. Топливо здесь сжигается для нагревания воздуха. При движении поршня от верхнего положения до нижнего через впускной клапан происходит всасывание горючей смеси в цилиндр (рис. 3.21). Этот процесс происходит при постоянном давлении. При обратном ходе поршня начинается сжатие горючей смеси. Сжатие

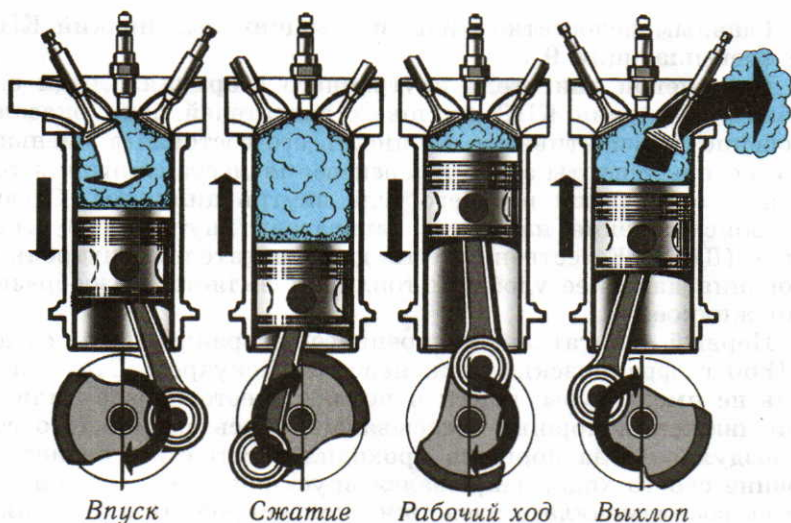


рис. 3.21

происходит быстро, и поэтому процесс близок к адиабатному.

В конце такта сжатия происходит воспламенение горючей смеси электрической искрой. Быстрое сгорание паров бензина сопровождается передачей рабочему телу количества теплоты Q_1 , резким возрастанием температуры и давления воздуха и продуктов сгорания. За короткое время горения смеси поршень практически не изменяет своего положения в цилиндре, поэтому процесс нагревания газа в цилиндре можно считать почти изохорным.

Под действием высокого давления поршень далее совершает рабочий ход от верхнего положения до нижнего. Этот процесс расширения рабочего тела близок к адиабатному.

В конце рабочего такта открывается выпускной клапан и рабочее тело соединяется с окружающей атмосферой. Выпуск отработанных газов сопровождается передачей количества теплоты Q_2 окружающему воздуху, играющему роль охладителя.

При длительной работе двигателя описанный цикл повторяется многократно. Но перед началом каждого цикла необходимо освободить цилиндр от продуктов сгорания, не содержащих кислорода, и произвести всасывание горючей смеси. Это осуществляется во время двух подготовительных тактов впуска и выпуска.

Для поршневых двигателей внутреннего сгорания важной характеристикой, определяющей полноту сгорания топлива и значительно влияющей на значение КПД, является степень сжатия горючей смеси: $\varepsilon = V_2/V_1$, где V_2 и V_1 — объемы в на-

чале и в конце сжатия. С увеличением степени сжатия возрастает начальная температура горючей смеси в конце такта сжатия, что способствует более полному ее сгоранию. У современных карбюраторных двигателей степень сжатия обычно составляет 8—9. Дальнейшему увеличению степени сжатия препятствует самовоспламенение (детонация) горючей смеси, происходящее еще до того, как поршень достигнет верхней мертвой точки. Это явление оказывает разрушающее действие на двигатель и снижает его мощность и КПД. Достигнуть указанных степеней сжатия без детонации удалось путем увеличения скорости движения поршня при повышении числа оборотов двигателя до 5—6 тыс. об/мин и применения бензина со специальными антидетонационными присадками.

Двигатель Дизеля. Чтобы повысить КПД двигателя внутреннего сгорания, немецкий инженер Р. Дизель в 1892 г. предложил использовать еще большие степени сжатия рабочего тела и расширение при постоянном давлении.

Высокая степень сжатия без детонации достигается в двигателе Дизеля за счет того, что сжатию подвергается не горючая смесь, а воздух. По окончании процесса сжатия в цилиндр впрыскивается горючее. Для его зажигания не требуется никакого специального устройства, так как при высокой степени адиабатного сжатия воздуха его температура повышается до 600—700 °С. Горючее, впрыскиваемое с помощью топливного насоса через форсунку, воспламеняется при соприкосновении с раскаленным воздухом.

Подача топлива управляется особым регулятором, в результате чего процесс горения протекает не столь кратковременно, как в карбюраторном двигателе. Поэтому часть процесса расширения, пока осуществляется подача топлива, происходит изобарно, а затем адиабатно. При обратном движении поршня осуществляется выпуск.

Современные дизели имеют степень сжатия 16—21 и КПД около 40%.

Паровая турбина. Первая паровая турбина, нашедшая практическое применение, была изготовлена шведским инженером Г. Лавалем в 1889 г. Ее мощность была меньше 4 кВт при частоте вращения ротора 500 об/с. При конструировании паровой турбины надо решить две проблемы. Во-первых, следует добиться, чтобы внутренняя энергия пара в максимальной степени превращалась в кинетическую энергию струи, вырывающейся из сопла. Во-вторых, следует добиться, чтобы кинетическая энергия струи в максимальной степени передавалась лопаткам ротора турбины.

Для экономичной работы турбины требуются сверхзвуковые скорости вращения ротора. Но при таких скоростях ротор турбины разрушится силами инерции. Для разрешения

этого противоречия приходится конструировать турбины, ротор которых вращается со скоростью, меньшей оптимальной. Чтобы полнее использовать кинетическую энергию струи пара, турбины делают многоступенчатыми, насаживая на общий вал несколько роторов возрастающего диаметра. Пар отдает часть своей кинетической энергии ротору меньшего диаметра, затем направляется на второй ротор большего диаметра, где отдает его лопаткам часть оставшейся кинетической энергии, и т. д. Отработавший пар конденсируется в охладителе-конденсаторе, а теплая вода направляется в котел.

КПД современных паровых турбин достигает 40%. Поэтому электрические генераторы всех тепловых и атомных электростанций приводятся в действие паровыми турбинами.

Так как температура пара, применяемого в современных паротурбинных установках, не превышает 580°C, а температура пара на выходе из турбины обычно не ниже 30°C, максимальный КПД паротурбинной установки как тепловой машины равен:

$$\eta_{\max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{853 \text{ К} - 303 \text{ К}}{853 \text{ К}} = 0,64,$$

а реальные значения КПД паротурбинных конденсационных электростанций достигают лишь около 40%.

Газовые турбины. Газотурбинная установка состоит из воздушного компрессора 1, камер сгорания 2, газовой турбины 3 и выпускного сопла 4 (рис. 3.22). При работе турбины ротор компрессора вращается, засасывает воздух и повышает давление воздуха в 5—7 раз. Процесс сжатия протекает почти адиабатно, поэтому температура воздуха значительно повышается, достигая 200°C и более.

Сжатый воздух поступает в камеру сгорания 2. Одновременно через форсунку в нее впрыскивается под большим давлением жидкое топливо — керосин, мазут. При горении топлива воздух, служащий рабочим телом, нагревается до

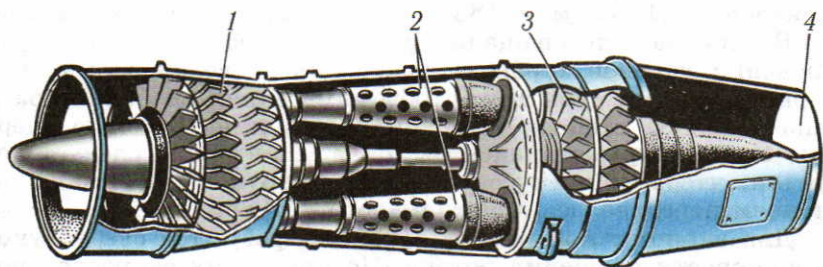


рис. 3.22

1500—2200 °С. Нагревание воздуха происходит при постоянном давлении, поэтому воздух расширяется и скорость его движения увеличивается.

Движущиеся с большой скоростью воздух и продукты горения направляются в турбину 3. Переходя от ступени к ступени, они отдают свою кинетическую энергию лопаткам ротора турбины. Часть полученной турбиной энергии расходуется на вращение компрессора, а остальная используется, например, для вращения винта самолета или ротора электрического генератора.

Цикл работы газовой турбины аналогичен циклу поршневого ДВС. Разница лишь в том, что в поршневом ДВС его четыре такта происходят последовательно во времени в одном месте — цилиндре, а в газовой турбине те же такты происходят одновременно в разных участках: всасывание и сжатие воздуха — в компрессоре, сжигание топлива — в камере сгорания, рабочий ход — в турбине и выпуск — в выпускном сопле.

КПД газотурбинных установок достигает 25—30%. У газотурбинных двигателей нет громоздких паровых котлов, как у паровых машин и паровых турбин, нет поршней и механизмов, преобразующих возвратно-поступательное движение во вращательное, как у паровых машин и двигателей внутреннего сгорания. Поэтому газотурбинный двигатель занимает вдвое меньше места, чем дизель той же мощности, а его удельная масса (отношение массы к мощности) в 6—9 раз меньше, чем у авиационного поршневого ДВС. Компактность и быстроходность в сочетании с большой мощностью на единицу массы определили первую практически важную область применения газотурбинных двигателей — авиацию.

Самолеты с винтом, насаженным на вал газотурбинного двигателя, появились в 1944 г. Турбовинтовые двигатели имеют такие известные самолеты, как Ил-18, Ан-22, Ан-124 «Руслан».

Турбореактивный двигатель. Газовая турбина может быть использована как реактивный двигатель. Воздух и продукты горения выбрасываются из газовой турбины с большой скоростью. Реактивная сила тяги, возникшая при этом, может быть использована для движения самолета, теплохода или железнодорожного состава.

Основное отличие турбореактивного двигателя от турбовинтового заключается в том, что в нем газовая турбина используется только для приведения в действие воздушного компрессора и отнимает у газовой струи, выходящей из камеры сгорания, лишь небольшую часть энергии. В результате газовая струя имеет на выходе из сопла высокую скорость и создает реактивную силу тяги.

Успешное применение турбореактивных двигателей

в авиации началось в 40-х гг. созданием реактивных истребителей, а первый в нашей стране реактивный пассажирский самолет Ту-104 вышел на линию Москва — Иркутск в 1956 г. Турбореактивными двигателями оборудованы самолеты Ил-62, Ту-154, Ил-86.

Ракетные двигатели. Реактивные двигатели, не использующие для своей работы окружающую среду, например воздух земной атмосферы, называют ракетными двигателями. Основные части ракетного двигателя — камера сгорания и сопло. В принципе для ракетного двигателя могут быть использованы различные источники энергии, но на практике пока применяют в основном химические. При сжигании горючего в камере сгорания химического ракетного двигателя образуются продукты горения в газообразном состоянии. Выход струи газа через сопло приводит к возникновению реактивной силы.

Конструкцию космической ракеты с жидкостным реактивным двигателем впервые предложил в 1903 г. К. Э. Циолковский.

Первая отечественная жидкостная ракета «ГИРД-09» была создана в 1933 г. по проекту М. К. Тихонравова. Двигатель ракеты работал на жидком кислороде и бензине.

Дальнейшая успешная разработка ракетно-космической техники, выполненная под руководством академика С. П. Королева, позволила осуществить в нашей стране запуск первого в мире искусственного спутника Земли (4 октября 1957 г.), полет вокруг Земли первого в мире космонавта Ю. А. Гагарина (12 апреля 1961 г.), запуск межпланетных станций на Луну, Марс, Венеру. Жидкостные реактивные двигатели для этих космических ракет разработаны под руководством академика В. П. Глушко.

Мощность первой ступени ракеты-носителя «Восток» с ЖРД достигала 15 ГВт.

В 1987 г. прошла успешные испытания новая мощная универсальная ракета-носитель «Энергия». Она имеет стартовую массу свыше 2000 т, способна выводить на орбиту более 100 т полезного груза.

■ Вопросы

1. Почему паровые машины вытеснены двигателями внутреннего сгорания? 2. Как работает четырехтактный двигатель внутреннего сгорания? 3. Для чего в цилиндр двигателя внутреннего сгорания впускается воздух? 4. По какому циклу работает дизельный двигатель? 5. В чем преимущество дизельного двигателя по сравнению с карбюраторным? 6. В чем преимущество паровой турбины над поршневым паровым двигателем? 7. Где применяют газовые турбины? 8. По какому циклу работает газовая турбина? 9. Какими преимуществами обладает газовая турбина по сравнению с паровой? 10. Как устроен ракетный двигатель? 11. Чем отличается турбореактивный двигатель от турбовинтового?

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1. На рисунке 3.23 представлена диаграмма цикла, осуществленного с одноатомным идеальным газом, взятым в количестве 0,2 моль. Участки BC и DA — адиабаты. Вычислите коэффициент полезного действия тепловой машины, работающей по этому циклу. Определите работу, совершенную газом на участке BC . Найдите максимальный КПД тепловой машины с использованием нагревателя и холодильника, с которыми осуществлен данный цикл, если в точке B газ находился в тепловом равновесии с нагревателем, а в точке D — в тепловом равновесии с холодильником.

Решение. Так как участки BC и DA — адиабаты, то передача количества теплоты Q_1 от нагревателя осуществляется только при изохорном процессе AB , а передача количества теплоты Q_2 холодильнику — только при изохорном процессе CD .

При изохорных процессах работа равна нулю, поэтому из первого закона термодинамики следует:

$$Q_1 = \Delta U_1 \text{ и } Q_2 = \Delta U_2.$$

Изменение внутренней энергии ΔU одноатомного идеального газа при изохорном процессе равно: $\Delta U = 3/2 \nu R \Delta T = 3/2 \nu R \Delta p$, следовательно, $Q_1 = 3/2 V_A \cdot \Delta p_{AB}$, $Q_2 = 3/2 V_C \cdot \Delta p_{CD}$.

Работа A , совершенная за цикл, равна: $A = Q_1 - Q_2 = 3/2 (V_A \Delta p_{AB} - V_C \Delta p_{CD})$.

$$\text{КПД цикла равен: } \eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{V_A \Delta p_{AB} - V_C \Delta p_{CD}}{V_A \Delta p_{AB}} = 1 - \frac{V_C \Delta p_{CD}}{V_A \Delta p_{AB}}.$$

Подставив данные величин из диаграммы на рисунке 3.23, получим

$$\eta = 1 - \frac{6 \cdot 10^{-3} \cdot 2,5 \cdot 10^5}{3 \cdot 10^{-3} \cdot 8 \cdot 10^5} = 1 - \frac{5}{8} = \frac{3}{8} = 0,375.$$

Работа газа при адиабатном расширении из состояния B в состояние C равна изменению внутренней энергии газа, взятому с противоположным знаком:

$$A_{BC} = -\Delta U_{BC} = 3/2 \nu R (T_B - T_C).$$

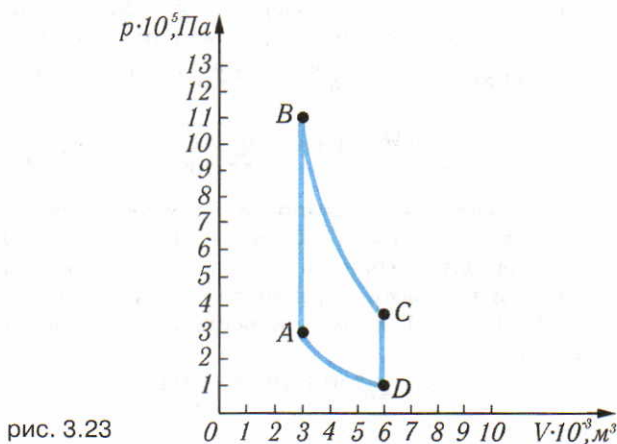


рис. 3.23

Используя уравнение состояния идеального газа, найдем значения температуры в точках B, C и D:

$$T_B = \frac{p_B V_B}{\nu R} = \frac{11 \cdot 10^5 \cdot 3 \cdot 10^{-3}}{0,2 \cdot 8,31} \text{ К} = 1986 \text{ К};$$

$$T_C = \frac{p_C V_C}{\nu R} = \frac{3,5 \cdot 10^5 \cdot 6 \cdot 10^{-3}}{0,2 \cdot 8,31} \text{ К} = 1263 \text{ К};$$

$$T_D = \frac{p_D V_D}{\nu R} = \frac{1 \cdot 10^5 \cdot 6 \cdot 10^{-3}}{0,2 \cdot 8,31} \text{ К} = 361 \text{ К}.$$

Работа на участке BC: $A_{BC} = 3/2 \nu R (T_B - T_C) = 3/2 \cdot 0,2 \cdot 8,31 \cdot 723 \text{ Дж} = 1802 \text{ Дж} = 1,8 \text{ кДж}$.

Максимальный КПД тепловой машины равен:

$$\eta_{\max} = \frac{T_1 - T_2}{T_2} = \frac{T_B - T_D}{T_B} = \frac{1986 - 361}{1986} = 0,82.$$

Как видно, КПД исследуемого цикла в 2,2 раза меньше КПД цикла Карно, работающего в том же температурном интервале.

Задача 2. Космический корабль массой 4,0 т двигался вокруг Земли по круговой орбите на высоте $h_1 = 200 \text{ км}$ от ее поверхности. В результате включения на короткое время Δt ракетного двигателя скорость космического корабля увеличилась на $\Delta v = 10 \text{ м/с}$, а траектория движения стала эллипсом с минимальным удалением от поверхности Земли $h_1 = 200 \text{ км}$ и максимальным удалением от поверхности Земли $h_2 = 234 \text{ км}$. С какой скоростью v_2 движется космический корабль в точке максимального удаления от поверхности Земли? Чему равны сила тяги F ракетного двигателя, время Δt его работы, масса израсходованного топлива Δm ? Изменением массы космического корабля пренебречь. Масса Земли и ее радиус соответственно равны $M = 6 \cdot 10^{24} \text{ кг}$ и $R = 6370 \text{ км}$, гравитационная постоянная $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$, секундный расход топлива $\mu = \frac{\Delta m}{\Delta t} = 1 \text{ кг/с}$, скорость истечения газов $v = 4,0 \cdot 10^3 \text{ м/с}$, удельная теплота сгорания горючего и окислителя $q = 1,2 \cdot 10^7 \text{ Дж/кг}$.

Решение. Скорость v_1 космического корабля в точке минимального удаления от поверхности Земли после его ускорения равна: $v_1 = v_0 + \Delta v$. Скорость v_0 движения по круговой орбите можно найти из уравнения $\frac{mv_0^2}{R_1} = G \frac{Mm}{R_1^2}$, где $R_1 = R + h_1 = 6,57 \cdot 10^6 \text{ м}$, откуда

$$v_1 = \sqrt{\frac{GM}{R_1}} = \sqrt{\frac{6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 6 \cdot 10^{24}}{6,57 \cdot 10^6}} \text{ м/с} = 7,805 \cdot 10^3 \text{ м/с}.$$

Следовательно, на минимальном удалении от Земли скорость ракеты равна: $v_1 = 7,805 \cdot 10^3 \text{ м/с} + 10 \text{ м/с} = 7,815 \cdot 10^3 \text{ м/с}$.

По закону сохранения момента импульса для космического корабля выполняется равенство $mv_1 R_1 = mv_2 R_2$, где $R_2 = R + h_2 = 6,604 \cdot 10^6 \text{ м}$. Поэтому скорость v_2 в точке максимального удаления равна:

$$v_2 = \frac{v_1 R_1}{R_2} = \frac{7,815 \cdot 10^3 \cdot 6,570 \cdot 10^6}{6,604 \cdot 10^6} \text{ м/с} = 7,775 \cdot 10^3 \text{ м/с}.$$

Силу тяги F ракетного двигателя найдем из уравнения $F\Delta t = \Delta m v$, где Δm — масса газов, выброшенных ракетным двигателем за время Δt ; v — скорость истечения газовой струи. Перепишем это уравнение в виде $F = \frac{\Delta m}{\Delta t} v = \mu v = 1 \cdot 4,0 \cdot 10^3 \text{ Н} = 4,0 \cdot 10^3 \text{ Н} = 4 \text{ кН}$.

Время работы двигателя можно найти по изменению импульса космического корабля: $F\Delta t = m\Delta v$, где m — масса космического корабля; Δv — изменение его скорости. Итак, $\Delta t = \frac{m\Delta v}{F} = \frac{4,0 \cdot 10^3 \cdot 10}{4,0 \cdot 10^3} \text{ с} = 10 \text{ с}$.

Массу Δm израсходованного топлива и окислителя можно найти по закону сохранения импульса для системы «корабль — горючее»: $m\Delta v = \Delta m v$, откуда $\Delta m = \frac{m\Delta v}{v} = \frac{4,0 \cdot 10^3 \cdot 10}{4,0 \cdot 10^3} \text{ кг} = 10 \text{ кг}$.

Коэффициент полезного действия ракетного двигателя определяется выражением $\eta = \frac{N}{Q_c}$, где N — мощность двигателя; Q_c — теплота, ежесекундно выделяющаяся при сжигании топлива.

Так как $N = \frac{\mu v^2}{2}$, а $Q_c = \mu q$, то КПД ракеты равен: $\eta = \frac{v^2}{2q} = \frac{16 \cdot 10^6}{21,2 \cdot 10^7} = 0,67$.

■ Задачи для самостоятельного решения

35.1. Карбюраторный двигатель внутреннего сгорания работает по циклу (рис. 3.24), состоящему из двух адиабат (1,2; 3,4) и двух изохор (2,3; 1,4). Рассчитайте КПД двигателя при следующих значениях температур: $T_1 = 300 \text{ К}$, $T_2 = 524 \text{ К}$, $T_3 = 786 \text{ К}$, $T_4 = 450 \text{ К}$.

35.2. Дизельный двигатель внутреннего сгорания работает по циклу (рис. 3.25), состоящему из двух адиабат (1,2; 3,4), одной изобары (2,3) и одной изохоры (1,4). Рассчитайте КПД такого двигателя, если отношение удельных теплоемкостей при постоянном давлении и постоянном объеме равно $\gamma = \frac{c_p}{c_v} = 1,4$, а температуры газа имеют значения: $T_1 = 300 \text{ К}$, $T_2 = 750 \text{ К}$, $T_3 = 1200 \text{ К}$, $T_4 = 600 \text{ К}$.

35.3. Газотурбинная установка работает по циклу (рис. 3.26), состоящему из двух адиабат (1,2; 3,4) и двух изобар. Рассчитайте КПД такого двигателя, если температуры газа равны: $T_1 = 300 \text{ К}$, $T_2 = 900 \text{ К}$, $T_3 = 1800 \text{ К}$.

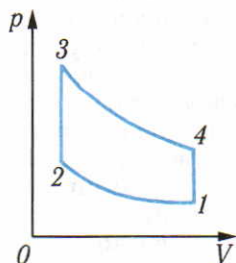


рис. 3.24

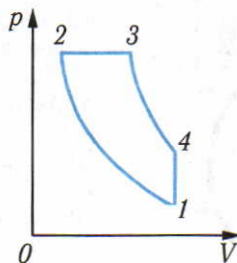


рис. 3.25

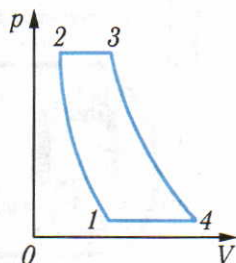


рис. 3.26

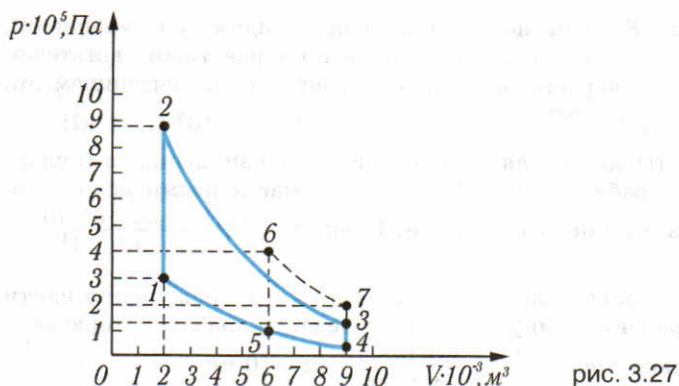


рис. 3.27

Указание: для нахождения T_4 воспользоваться формулой Пуассона для адиабатного процесса. Газ одноатомный.

35.4*. На рисунке 3.27 приведены диаграммы двух циклов, каждый из которых состоит из двух изохор и двух адиабат. При работе по какому из этих двух циклов двигатель имеет более высокий КПД? Газ одноатомный.

§ 36 Холодильные машины

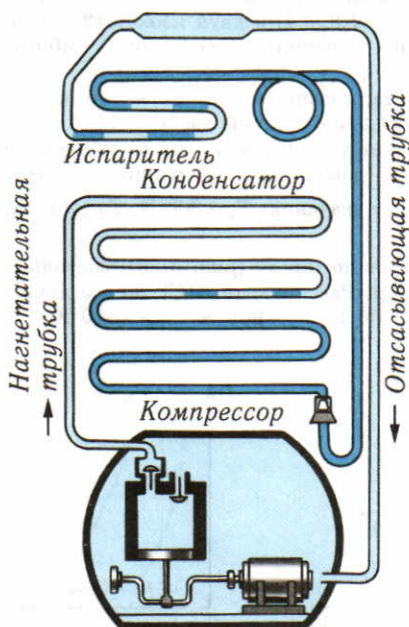


рис. 3.28

Холодильник. Не опровергает ли второй закон термодинамики работа холодильника? Действие его как раз заключается в том, что от более холодного тела, находящегося в морозильнике, отнимается некоторое количество теплоты и передается более нагретому телу. Этим более нагретым телом является воздух в комнате, который в результате работы холодильника нагревается до еще более высокой температуры.

Холодильник работает в полном соответствии со вторым законом термодинамики. Холодильник и воздух комнаты не составляют замкнутую систему. Холодильник подключен к электрической сети, а работу совершает его электродвигатель. Следовательно,

переход тепла от холодного тела к горячему не является единственным результатом работы холодильника, так как за счет работы электродвигателя этот процесс сопровождается превращением энергии электрического тока во внутреннюю энергию.

Рабочим телом в компрессионном холодильнике (рис. 3.28) служит жидкость, имеющая низкую температуру кипения, которой заполнена система конденсатора и испарителя. Компрессор, приводимый в действие электродвигателем, откачивает пары этой жидкости из испарителя и нагнетает их в конденсатор. При сжатии газ нагревается. Охлаждение его до комнатной температуры происходит в конденсаторе, расположенном обычно на задней стенке холодильного шкафа. Охлажденный до комнатной температуры при повышенном давлении, создаваемом в конденсаторе с помощью компрессора, газ переходит в жидкое состояние. Из конденсатора жидкость через капиллярную трубку поступает в испаритель. Откачка паров из испарителя с помощью компрессора поддерживает в нем пониженное давление. При пониженном давлении в испарителе жидкость кипит и испаряется даже при температуре ниже 0°C . Энергия на испарение жидкости отбирается от стенок испарителя, вызывая их охлаждение. Откачанные пары поступают в кожух компрессора, оттуда снова в конденсатор и т. д., по замкнутому кругу.

Самая низкая температура, которая может быть получена в испарителе (морозильной камере), определяется значением давления паров, так как температура кипения жидкости понижается с уменьшением давления. При постоянной скорости поступления жидкости из конденсатора в испаритель через капиллярную трубку давление паров в испарителе будет тем ниже, чем дольше работает компрессор. Если нет нужды добиваться понижения температуры в испарителе до предельно достижимого значения, то компрессор периодически останавливается путем выключения электромотора, приводящего его в действие. Компрессор включается автоматом, следящим за поддержанием в холодильном шкафу заданной температуры.

Рабочий цикл холодильной машины. В обратных процессах (циклах) холодильником по-прежнему называют тело с более низкой температурой, хотя теперь оно отдает тепло, а нагревателем — тело, имеющее более высокую температуру, хотя теперь оно его получает. При этом рабочее тело получает за один цикл от холодильника количество теплоты Q_2 , отдавая нагревателю количество теплоты Q_1 , которое больше полученного количества теплоты Q_2 на работу A' , совершаемую электромотором: $|Q_1| = Q_2 + A'$. Можно сказать, что в данном случае тепловая машина совершает отрицательную работу: $A = Q_2 - |Q_1| = -A'$.

В результате проведения обратного цикла увеличивается разность температур между нагревателем и холодильником. В этих условиях тепловая машина работает как тепловой насос.

Важнейшей характеристикой холодильной машины является *холодильный коэффициент*, равный отношению количества теплоты, отнятого от холодильной камеры, к работе электродвигателя (расходу электроэнергии):

$$\xi = \frac{Q_2}{A'} = \frac{Q_2}{|Q_1| - Q_2}.$$

В идеальной холодильной машине максимальный холодильный коэффициент равен:

$$\xi_{\max} = \frac{T_2}{T_1 - T_2},$$

в реальной машине —

$$\xi_p < \frac{T_2}{T_1 - T_2}.$$

Еще одна характеристика холодильной машины — *холодопроизводительность*. Она показывает, какое количество теплоты q способна отнимать машина у охлаждаемых тел в единицу времени:

$$q = \frac{Q_2}{t}.$$

Холодильная машина как тепловой насос. Нельзя ли использовать холодильную машину для обогрева помещения? Ведь, как мы выяснили, эта машина охлаждает холодное тело (внутреннюю емкость холодильника) и нагревает более горячее, например окружающий воздух в помещении. Ответ на поставленный вопрос уже по существу дан: холодильная машина может служить обогревателем. Но стоит ли это делать, не лучше ли пользоваться обычными электроотопительными приборами, более простыми по устройству, чем тепловые насосы?

Чтобы ответить на этот вопрос, найдем соотношение между количеством теплоты Q_2 , отнятым у холодного тела, и количеством теплоты Q_1 , переданным нагретому телу.

Поскольку в обратном цикле сжатие газа происходит при более высокой температуре, чем расширение, то работа сжатия больше работы расширения ($|A'_{\text{сж}}| > |A'_{\text{расш}}|$). Таким образом, за каждый обратный цикл внешние силы совершают положительную работу:

$$A' = |A'_{\text{сж}}| - |A'_{\text{расш}}| > 0.$$

Применив первый закон термодинамики к изотермическим процессам сжатия и расширения, найдем:

$$Q_1 = |A'_{\text{сж}}|; \quad Q_2 = |A'_{\text{расш}}|,$$

следовательно,

$$Q_1 = Q_2 + A' > Q_2.$$

В полном соответствии с первым законом термодинамики мы получили, что за счет работы компрессора A' холодильник отдает в окружающее пространство большее количество теплоты, чем то, которое он отнимает у морозильной камеры.

Если холодильную камеру вынести на улицу, а конденсатор оставить в помещении, то при совершении компрессором работы A' за счет энергии электрической сети от холодного воздуха на улице будет отнято количество теплоты Q_2 и теплоту воздуху в комнате будет передано количество теплоты $|Q_1| = Q_2 + A'$. Так можно использовать холодильную машину для обогрева помещения. Холодильную машину, работающую по такому принципу, называют *тепловым насосом*.

Ответим теперь на поставленный выше вопрос: выгодно ли пользоваться тепловым насосом? Коэффициент полезного действия электронагревателя можно считать равным единице. Эффективность теплового насоса характеризуется *отопительным коэффициентом*, равным отношению количества теплоты, которое получает отапливаемое помещение, к работе электродвигателя (расходу электроэнергии):

$$\psi_{\max} = \frac{|Q_1|}{A'} = \frac{|Q_1|}{|Q_1| - Q_2} = \frac{T_1}{T_1 - T_2} > 1.$$

У реального теплового насоса $\psi_p < \frac{T_1}{T_1 - T_2}$.

Но и в этом случае добиваются, чтобы выполнялось условие $\psi_p > 1$, иначе теряет смысл сама идея теплового насоса как более экономичной отопительной системы.

В качестве примера рассмотрим случай, когда температура наружного воздуха $t_2 = 0^\circ\text{C}$, а внутри дома тепловой насос должен поддерживать температуру $t_1 = +20^\circ\text{C}$. Для этих значений температур максимальный отопительный коэффициент равен:

$$\psi_{\max} = \frac{T_1}{T_1 - T_2} = \frac{293\text{ К}}{293\text{ К} - 273\text{ К}} = 14,5.$$

Это значит, что, пользуясь тепловым насосом, работающим за счет электрической энергии двигателя, мы можем «накачать» в помещение примерно в 15 раз большее количество теплоты, чем получили бы при той же затрате энергии от электронагревательного прибора.

■ Вопросы

1. Опровергает ли работа холодильника второй закон термодинамики?
2. Как устроен холодильник и каков принцип его действия?
3. Что такое тепловой насос?
4. Выполняются ли первый и второй законы термодинамики при работе теплового насоса?

§ 37 Тепловые машины и охрана природы

Роль тепловых двигателей в загрязнении окружающей среды. Непрерывное развитие энергетики, автомобильного и других видов транспорта, возрастание потребления угля, нефти и газа в промышленности и на бытовые нужды увеличивает возможности удовлетворения жизненных потребностей человека. Однако в настоящее время количество ежегодно сжигаемого в различных тепловых машинах химического топлива настолько велико, что все более сложной проблемой становится охрана природы от вредного влияния продуктов сгорания. Отрицательное влияние тепловых машин на окружающую среду связано с действием различных факторов.

Во-первых, при сжигании топлива используется кислород из атмосферы, вследствие чего содержание кислорода в воздухе постепенно уменьшается.

Во-вторых, сжигание топлива сопровождается выделением в атмосферу углекислого газа. В атмосфере Земли в настоящее время содержится около 2600 млрд т углекислого газа (около 0,033%). До периода бурного развития энергетики и транспорта количество углекислого газа, поглощаемого из атмосферы при фотосинтезе растениями и растворяемого в океане, было равно количеству углекислого газа, выделяемого при дыхании и гниении. В последние десятилетия этот баланс все в большей степени стал нарушаться. В настоящее время за счет сжигания угля, нефти и газа в атмосферу Земли ежегодно поступает дополнительно около 20 млрд т углекислого газа. Это приводит к повышению концентрации углекислого газа в атмосфере Земли.

Молекулы оксида углерода способны поглощать инфракрасное излучение. Поэтому увеличение концентрации углекислого газа в атмосфере изменяет ее прозрачность. Инфракрасное излучение, испускаемое земной поверхностью, все в большей мере поглощается в атмосфере. Дальнейшее существенное увеличение концентрации углекислого газа в атмосфере может привести к повышению ее температуры (парниковый эффект).

В-третьих, при сжигании угля и нефти атмосфера загрязняется азотными и серными соединениями, вредными для здоровья человека. Особенно существенно это загрязнение в крупных городах и промышленных центрах.

Более половины всех загрязнений атмосферы создает транспорт. Кроме оксида углерода и соединений азота, автомобильные двигатели ежегодно выбрасывают в атмосферу 2—3 млн т свинца. (Соединения свинца добавляют в автомобильный бензин для предотвращения детонации топлива в двигателе, приводящей к снижению мощности двигателя и его быстрому износу.) Так как автомобильные двига-

тели играют решающую роль в загрязнении атмосферы в городах, проблема их усовершенствования представляет одну из наиболее актуальных научно-технических задач.

Один из путей уменьшения загрязнения окружающей среды — использование дизелей вместо карбюраторных бензиновых двигателей, так как в топливо дизелей не добавляют соединения свинца. Перспективными являются разработки и испытания автомобилей, в которых вместо бензиновых двигателей применяются электродвигатели, питающиеся от аккумуляторов, или двигатели, использующие в качестве топлива водород. В последнем типе двигателя при сгорании водорода образуется вода. Однако здесь возникает масса технических проблем, не решенных до сих пор.

Использование твердого топлива. Запасы нефти и газа, на которые последние десятилетия ориентировалась теплоэнергетика, ограничены. Добыча нефти, осуществляемая с больших глубин, в более трудных условиях (например, морская добыча) обходится все дороже. Развитие теплоэнергетики связывается в основном с использованием твердого топлива, в первую очередь угля, так как разведанные запасы нефти и газа существенно меньше угольных. В ряде случаев добыча угля обходится намного дешевле добычи нефти.

Но при использовании твердого топлива приходится решать целый ряд проблем. Горение твердого топлива намного сложнее горения газообразного или жидкого топлива. В топке котлоагрегата, сжигающего уголь, одновременно происходит несколько процессов. Энергоблок на угле мощностью 500—800 мВт вырабатывает около 2000 т пара в час, сжигая около 200 т калорийного угля. В низкокачественных топливах негорючая часть составляет около 50% объема, поэтому требуется около 400 т угля для часовой работы такой турбины. Негорючая часть топлива превращается в шлак.

Вопросы охраны окружающей среды становятся все более определяющими для дальнейшего развития теплоэнергетики. С этой точки зрения тепловые электростанции, работающие на угле, далеко не совершенны прежде всего из-за большого количества оксидов серы в газах, выходящих с электростанции. Если эти газы пропустить через специальные устройства — скрубберы, в которых сера связывается известью, то концентрация оксида серы существенно уменьшится.

Еще один метод, достаточно чистый с точки зрения экологии, — сжигание угля в кипящем слое. В этом случае зола не плавится, так как горение идет при более низкой температуре, чем в факеле. Если в кипящий слой добавить известняк, то он погасит оксид серы. Вообще, в энергетике уголь называют «трудным топливом», использование которого связано со многими экономическими и экологическими проблемами. Современная ТЭС мощностью 3 ГВт потребляет

в год 13—14 млн т угля. Для ее работы в угольных карьерах должно быть вскрыто около 100 га земли. Сама ТЭС с учетом подъездных путей, водохранилищ, золоотвалов занимает сотни гектаров.

Перегрев окружающей среды. Выбросы вредных веществ в атмосферу не единственная сторона воздействия энергетики на природу. Различные стадии преобразования энергии органического топлива в электрическую сопровождаются выделением энергии в окружающую среду. Если тепловые сбросы мощной теплоэлектростанции передать проточной воде, то ее температура повысится примерно на 5 °С. Такое воздействие на гидросферу нельзя допустить, оно приведет к изменению теплового режима в реках. Поэтому рядом с теплоэлектростанциями создаются пруды-охладители площадью 10—20 км², изолированные от рек и озер.

При переработке угля все шире применяется метод подземной газификации углей, дающий высококалорийный газ и жидкие углеводороды, которые используются также как топливо или как сырье для органического синтеза.

Более половины возможностей экономии топливно-энергетических ресурсов дает автотранспорт. Если дизельными двигателями, которые примерно на треть экономичнее карбюраторных, оборудовать 65% грузовых и хотя бы 20% легковых автомобилей, то суммарный расход топлива сократится на 10 млн т в год.

Повышение КПД установок. Важнейшая характеристика энергетических установок — их КПД. Максимальный КПД тепловой электростанции не превышает 40—42%, а у других теплоустановок он еще ниже: у лучших карбюраторных двигателей внутреннего сгорания около 30%, у дизельных около 40%. Столь низкий КПД теплоэнергетики связан с целым рядом причин. Одна из главных — отсутствие жаропрочных материалов, способных выдерживать в течение долгого времени высокие давления и температуры.

Возможно, что будущее тепловой энергетики связано с комбинированными установками, в которых паровая турбина работает совместно с газовой. Горячие газы, имеющие температуру до 1200 °С, подаются в газовую турбину. Затем несколько остывшие, но имеющие еще температуру 500—600 °С газы подаются в парогенератор паровой турбины. Далее работа осуществляется как в обычной паровой турбине. Такое совместное использование газа и пара позволит получить КПД комбинированной установки до 48%.

■ Вопросы

1. К каким отрицательным последствиям для окружающей среды приводит широкое использование тепловых машин в энергетике и на транспорте? 2. Каковы пути уменьшения отрицательного влияния тепловых машин на окружающую среду?



ЭЛЕКТРО- ДИНАМИКА

При изучении механических и тепловых явлений рассматривались законы, управляющие этими явлениями, обсуждались модели внутреннего строения тел, объясняющие механические и тепловые свойства тел. Однако не были выяснены очень важные вопросы: какова природа сил молекулярного взаимодействия? Какова природа сил упругости, возникающих при деформации тел?

Не все явления в природе можно понять и объяснить с помощью законов механики, молекулярно-кинетической теории строения вещества и термодинамики. В молекулярной физике использовались представления о силах притяжения и отталкивания между атомами и молекулами, но не выяснялась природа межатомных и межмолекулярных сил. Взаимодействия атомов и молекул, взаимодействия частиц внутри атомов объясняются на основе представлений о том, что в природе существуют *электрические заряды* и *электромагнитное поле*.

Законы взаимодействия электрических зарядов, действия на них электромагнитных полей изучает раздел физики, называемый *электродинамикой*.

Закон сохранения
электрического заряда

Электрические заряды. Повседневным явлением, в котором обнаруживается факт существования в природе электрических зарядов, является процесс *электризации тел* при соприкосновении. Для изучения явлений электризации проведем следующие опыты.

Отрежем полоску бумаги шириной около 1 см. Поднеся к полоске какой-нибудь пластмассовый предмет, например ручку, убедимся, что они не взаимодействуют друг с другом. Положив полоску на тетрадь, проведем по ней несколько раз пластмассовой ручкой с легким нажимом. Затем возьмем полоску бумаги в одну руку, а ручку — в другую и будем их сближать. Бумажная полоска изгибается в сторону ручки, т. е. между бумажной полоской и ручкой возникают силы притяжения (рис. 4.1).

Очевидно, что наблюдаемые в опыте силы притяжения между бумажной полоской и пластмассовой ручкой не являются силами всемирного тяготения, так как возникают только после соприкосновения тел и не зависят от их масс. Этот новый тип взаимодействия тел называется *электростатическим взаимодействием*. Электростатическое взаимодействие тел объясняется существованием электрических зарядов. Процесс возникновения электрических зарядов на телах при соприкосновении (а также при некоторых других процессах, которые будут рассмотрены ниже) называется *электризацией тел*.



рис. 4.1



рис. 4.2

Два вида электрических зарядов. Продолжим опыты по изучению взаимодействия электрических зарядов. Отрежем две полоски бумаги шириной около 1 см. Сближая полоски, убеждаемся, что между ними нет заметных сил взаимодействия. Положив полоски рядом на тетрадь, проведем по ним пластмассовой ручкой несколько раз с легким нажимом. Чтобы полоски не изгибались, перевернем их и столько же раз проведем ручкой по другой стороне полосок.

Взяв полоски в руки, станем сближать их. Опыт показывает, что при сближении полоски изгибаются, отталкиваясь друг от друга (рис. 4.2). Следовательно, в отличие

от сил всемирного тяготения, которые всегда являются силами притяжения, при электростатическом взаимодействии электрических зарядов могут наблюдаться как силы притяжения, так и силы отталкивания.

Способность электрических зарядов в одних случаях к взаимному притяжению, в других — к отталкиванию объясняется существованием двух различных видов зарядов. Один из них называли положительным, а другой — отрицательным. Заряды обозначают буквой q или Q .

Очевидно, что при соприкосновении с одной и той же пластмассовой ручкой на обеих одинаковых полосках бумаги появляются электрические заряды одного знака. Эти полоски отталкиваются, следовательно, между электрическими зарядами одинакового знака действуют силы отталкивания. Между электрическими зарядами противоположных знаков действуют силы притяжения.

Электрометр. Для обнаружения и измерения электрических зарядов применяется *электрометр*. Электрометр состоит из металлического стержня и стрелки, которая может вращаться вокруг горизонтальной оси. Стержень со стрелкой закреплен в плексигласовой втулке и помещен в металлический корпус цилиндрической формы, закрытый стеклянными крышками.

Натираям о мех или бумагу сообщим заряд эбонитовой палочке, а затем прикоснемся палочкой к стержню электрометра. Мы увидим, что стрелка электрометра отклоняется на некоторый угол (рис. 4.3). Поворот стрелки объясняется тем, что при соприкосновении заряженного тела со стержнем электрометра электрические заряды распределяются по стрелке и стержню. Силы отталкивания, действующие между одноименными электрическими зарядами на стержне и стрелке, вызывают поворот стрелки. Наэлектризуем эбонитовую палочку еще раз и вновь коснемся ею стержня электрометра. Опыт показывает, что при увеличении электрического заряда на стержне угол отклонения стрелки от вертикального положения увеличивается. Следовательно, по углу отклонения стрелки электрометра можно судить о значении электрического заряда, переданного стержню электрометра.

Закон сохранения электрического заряда. Воспроизведем теперь опыты, результаты которых в свое время послужили основой для создания современного учения об электричестве. Опыты, результаты которых лежат в основе построения теории, называют *фундаментальными*.

Установим на демонстрационном столе два одинаковых электрометра. На

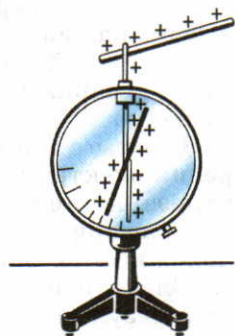


рис. 4.3

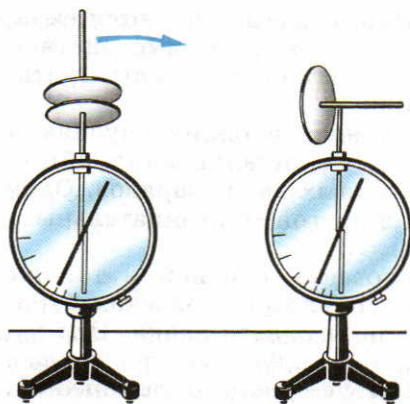


рис. 4.4

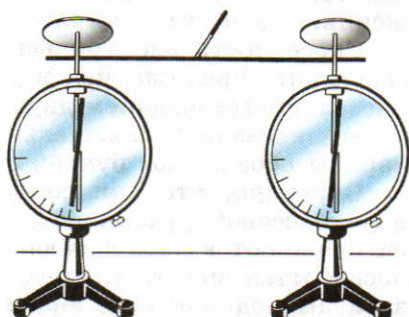


рис. 4.5

стержне одного из них укрепим металлический диск и поставим на него второй такой же диск с ручкой из изолятора. Между дисками поместим прослойку из сукна. Взявшись за ручку, совершив несколько движений верхним диском по прослойке и поднимем верхний диск.

После удаления верхнего диска стрелка электрометра отклоняется, обнаруживая появление электрического заряда на диске и стержне электрометра (рис. 4.4, слева). Прикоснемся верхним диском к стержню второго электрометра. Опыт показывает, что стрелка второго электрометра после прикосновения отклоняется примерно на такой же угол, что и стрелка первого электрометра (рис. 4.4, справа). Это значит, что в результате электризации при соприкосновении электрические заряды появились на двух соприкасающихся телах — на первом диске с сукном и на втором диске.

Теперь выполним последнюю часть опыта — соединим проводником стержни первого и второго электрометров. При этом стрелки первого и второго электрометров возвращаются в вертикальное положение (рис. 4.5). Наблюдаемая в опыте взаимная нейтрализация электрических зарядов показывает, что суммарный электрический заряд на двух дисках равен нулю.

Опыты с применением самых точных приборов для измерения электрических зарядов показали, что в результате электризации тел при соприкосновении на них всегда возникают электрические заряды, равные по модулю и противоположные по знаку.

Электрические заряды могут появляться на телах не только в результате электризации при соприкосновении тел, но и при других взаимодействиях, например под воздействием света. Однако внутри изолированной системы при любых взаи-

модействиях алгебраическая сумма электрических зарядов остается постоянной:

$$q_1 + q_2 + \dots + q_n = \text{const.}$$

Этот экспериментально установленный факт называется *законом сохранения электрического заряда*.

Изолированной (или замкнутой) системой называют систему тел, в которую не вводятся извне и не выводятся из нее электрические заряды.

Нигде и никогда в природе не возникает и не исчезает электрический заряд одного знака. Появление положительного электрического заряда всегда сопровождается появлением равного по модулю отрицательного заряда. Ни положительный, ни отрицательный заряд не могут исчезнуть в отдельности, они могут лишь взаимно нейтрализовать друг друга, если равны по модулю.

Электрические заряды и строение вещества. Опыт показывает, что нейтральные атомы и молекулы любого химического вещества могут стать заряженными частицами — положительными или отрицательными ионами. Следовательно, электрическими зарядами обладают частицы, из которых состоят атомы и молекулы.

Как известно, в состав любого атома входит положительно заряженное ядро и отрицательно заряженные электроны. В нейтральном атоме суммарный заряд электронов в точности равен заряду атомного ядра. Тело, состоящее из нейтральных атомов и молекул, имеет суммарный электрический заряд, равный нулю.

Если в результате какого-либо взаимодействия часть электронов переходит от одного тела к другому, то одно тело приобретает отрицательный электрический заряд, а второе — равный по модулю положительный электрический заряд. При соприкосновении двух разноименно заряженных тел избыточное число электронов переходит с отрицательно заряженного тела к телу, у которого часть атомов не имела полный комплект электронов на своих оболочках.

■ Вопросы

1. Чем объясняется электризация тел при соприкосновении? 2. Какие опыты доказывают существование двух видов электрического заряда? 3. Каков принцип действия электрометра? 4. Какие частицы являются носителями отрицательных и положительных зарядов? 5. Как формулируется закон сохранения электрического заряда?

■ Задачи для самостоятельного решения

38.1. Со стержня электрометра сняли заряд $+q$, затем ему передали заряд $-q$. Каким стал электрический заряд на стержне?

38.2. Капля дождя, несущая положительный электрический заряд $+2q$, соединилась с каплей дождя, несущей отрицательный электрический заряд $-3q$. Каким стал общий заряд капли?

■ ЗАДАНИЕ

Выполните опыт по электризации тел при соприкосновении. Пронаблюдайте отталкивание одноименно заряженных тел и притяжение разноименно заряженных тел.

§ 39 Закон Кулона

Взаимодействие зарядов. Взаимодействие неподвижных электрических зарядов изучает *электростатика*. Основным законом электростатики был экспериментально установлен французским физиком Ш. Кулоном в 1785 г. В опытах Кулона измерялись силы взаимодействия заряженных шаров. На тонкой проволоке была подвешена стеклянная палочка с двумя металлическими шарами на концах. Одному из них сообщался электрический заряд, против него устанавливался другой заряженный шар (рис. 4.6). Сила взаимодействия заряженных шаров определялась по углу поворота стеклянной палочки, закручивающей нить подвеса. Расстояние между центрами шаров нетрудно было измерить.

У Кулона не было метода измерения заряда на шарах. Но он применил интересный прием дробления заряда. Исходя из принципа симметрии, Кулон пришел к выводу, что при соприкосновении металлического шара с зарядом q с незаряженным шаром такого же радиуса электрический заряд разделяется на две равные части и на каждом из шаров оказывается заряд $q/2$.

Из опытов Кулона по измерению сил взаимодействия между заряженными шариками следовало, что модуль F_e силы взаимодействия двух неподвижных шаров прямо пропорционален произведению модулей зарядов $|q_1|$ и $|q_2|$ и обратно пропорционален квадрату расстояния r между ними:

$$|F_e| = k \frac{|q_1||q_2|}{r^2}. \quad (39.1)$$

Взаимодействие неподвижных электрических зарядов называют *электростатическим* или *кулоновским* взаимодействием.

Хотя Кулон производил опыты с шариками конечных размеров и точность эксперимента была невелика, ему удалось точно сформулировать *основной закон электро-*

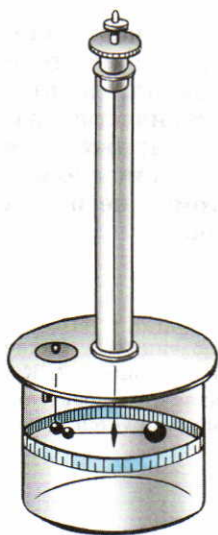


рис. 4.6

статики: два точечных неподвижных электрических заряда взаимодействуют в вакууме с силой, пропорциональной произведению модулей этих зарядов и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними.

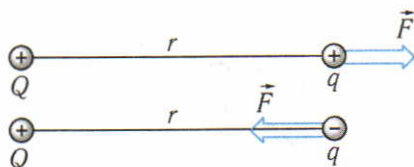


рис. 4.7

Справедливость этого закона подтверждена с огромной точностью всей совокупностью исследований электромагнитных явлений.

Направление кулоновской силы. Кулоновская сила направлена вдоль прямой, соединяющей оба точечных заряда. Она подчиняется третьему закону Ньютона: заряды взаимодействуют друг с другом с силами, равными по модулю и противоположными по направлению. Рассмотрим, как направлена сила, с которой заряд Q действует на пробный заряд q (рис. 4.7).

Направим радиус-вектор $\vec{r}$ от заряда Q к пробному заряду q .

Поскольку одноименные заряды отталкиваются, а разноименные притягиваются, то в случае одноименных зарядов вектор силы имеет то же направление, что и радиус-вектор. В случае же взаимодействия разноименных зарядов вектор силы направлен противоположно радиусу-вектору.

Единица электрического заряда. Единицей электрического заряда в СИ служит кулон (Кл). 1 Кл — это количество электричества, проходящее за 1 с через поперечное сечение проводника при силе тока 1 А:

$$1 \text{ Кл} = 1 \text{ А} \cdot 1 \text{ с}.$$

Определение единицы силы тока 1 А будет дано в § 53.

Электрическая постоянная. Как показывает опыт, при таком выборе единицы электрического заряда коэффициент пропорциональности k в выражении закона Кулона оказывается равным:

$$k = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2.$$

Таким образом, два точечных заряда Q и q , каждый из которых равен 1 Кл, взаимодействуют в вакууме на расстоянии $r = 1 \text{ м}$ с силой $F = 9 \cdot 10^9 \text{ Н}$.

Вместо коэффициента k часто применяется другой коэффициент, называемый *электрической постоянной*:

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}.$$

Тогда закон Кулона будет записан так:

$$F = \frac{|Q||q|}{4\pi\epsilon_0 r^2}. \quad (39.2)$$

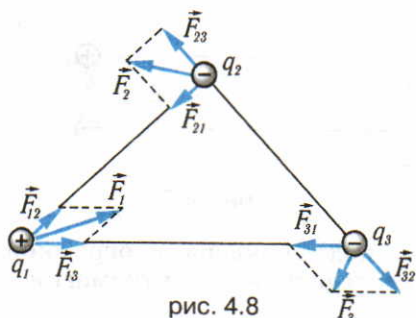


рис. 4.8

Принцип суперпозиции.

Опыт показывает, что сила взаимодействия двух неподвижных точечных зарядов q_1 и q_2 не изменяется при появлении около них третьего заряда q_3 , четвертого q_4 и т. д. Силы взаимодействия $\vec{F}_{12}$, $\vec{F}_{13}$, ..., $\vec{F}_{1n}$ заряда q_1 с каждым из зарядов $q_2, q_3, \dots, q_n$ определяются по зако-

ну Кулона, а результирующая сила взаимодействия $\vec{F}_1$ является геометрической суммой векторов сил взаимодействия заряда q_1 с каждым из этих зарядов (рис. 4.8):

$$\vec{F}_1 = \vec{F}_{12} + \vec{F}_{13} + \dots + \vec{F}_{1n}. \quad (39.3)$$

Независимость электрического взаимодействия двух точечных зарядов от присутствия других зарядов свидетельствует о том, что для сил электростатического взаимодействия справедлив принцип суперпозиции, о котором шла речь в § 3.

Вопросы

1. Опишите опыты Кулона по исследованию взаимодействия электрических зарядов. 2. Чем отличается закон Кулона от закона всемирного тяготения? 3. В каких единицах выражается электрический заряд? 4. В чем состоит принцип суперпозиции? 5. Что такое электрическая постоянная?

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Задача. Точечные электрические заряды q_1 , q_2 и q_3 находятся в вершинах прямоугольника. Определите силу $\vec{F}_3$, с которой действуют на заряд q_3 электрические заряды q_1 и q_2 . Расстояние между зарядами q_3 и q_1 равно 1 см, между зарядами q_3 и q_2 — 3 см; $q_3 = 10^{-9}$ Кл, $q_1 = -10^{-9}$ Кл, $q_2 = -4 \cdot 10^{-9}$ Кл.

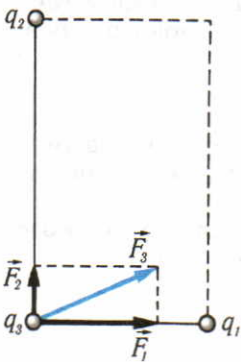


рис. 4.9

Решение. Сила $\vec{F}_3$, с которой электрические заряды q_1 и q_2 действуют на заряд q_3 , находится как сумма сил $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$, действующих со стороны каждого из зарядов q_1 и q_2 на заряд q_3 (рис. 4.9): $\vec{F}_3 = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$.

Так как угол между векторами $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ равен 90° , то модуль вектора $\vec{F}_3$ можно найти, используя теорему Пифагора: $F_3 = \sqrt{F_1^2 + F_2^2}$, где

$$F_1 = k \frac{|q_1| |q_3|}{r_1^2} = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 10^{-9} \cdot 10^{-9}}{10^{-4}} \text{ Н} = 9 \cdot 10^{-5} \text{ Н};$$

$$F_2 = k \frac{|q_2| |q_3|}{r_2^2} = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 4 \cdot 10^{-9} \cdot 10^{-9}}{9 \cdot 10^{-4}} \text{ Н} = 4 \cdot 10^{-5} \text{ Н};$$

$$F_3 = \sqrt{81 \cdot 10^{-10} + 16 \cdot 10^{-10}} \text{ Н} \approx 10^{-4} \text{ Н}.$$

Задачи для самостоятельного решения

39.1. Как изменится сила электростатического взаимодействия двух точечных зарядов при увеличении расстояния между ними в три раза?

39.2. Как изменится сила электростатического взаимодействия двух заряженных шаров, если расстояние между их центрами увеличится в два раза и заряд одного из шаров увеличится также в два раза?

39.3. Вычислите силу кулоновского притяжения между электроном и протоном в атоме водорода. Заряд электрона отрицательный и равен по модулю $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, заряд протона положительный и равен по модулю заряду электрона. Радиус орбиты электрона равен примерно $5 \cdot 10^{-11}$ м.

39.4. Сравните силы гравитационного и электрического взаимодействия между электроном и протоном. Масса электрона $9,1 \cdot 10^{-31}$ кг, масса протона $1,67 \cdot 10^{-27}$ кг.

39.5. Три отрицательных заряда, по модулю равные $9 \cdot 10^{-8}$ Кл, расположены в вершинах равностороннего треугольника. Какой заряд нужно поместить в центр этого треугольника, чтобы система зарядов находилась в равновесии? Будет ли равновесие устойчивым?

39.6. В трех вершинах квадрата со стороной 10 см находятся одинаковые точечные положительные заряды, равные $3 \cdot 10^{-8}$ Кл. С какой силой будут действовать эти заряды на положительный точечный электрический заряд $2 \cdot 10^{-8}$ Кл, расположенный в четвертой вершине квадрата?

39.7. Какая доля атомов в звездах должна потерять электроны для того, чтобы силы кулоновского отталкивания положительно заряженных звезд скомпенсировали силы всемирного тяготения? Звезды считайте состоящими из водорода.

§ 40 Электрическое поле

Идея Фарадея. Взаимодействие зарядов по закону Кулона является экспериментально установленным фактом. Однако математическое выражение закона взаимодействия зарядов не раскрывает физической картины самого процесса взаимодействия, не отвечает на вопрос, каким путем осуществляется действие одного заряда на другой.

Великий английский физик М. Фарадей дал факту взаимодействия электрических зарядов следующее объяснение: вокруг каждого электрического заряда всегда существует *электрическое поле*. Электрическое поле — материальный объект, непрерывный в пространстве и способный действовать на другие электрические заряды.

Согласно этим представлениям взаимодействие электрических зарядов q_1 и q_2 есть результат действия поля заряда q_1 на заряд q_2 и соответственно поля заряда q_2 на заряд q_1 .

То, что электрическое поле *объективно существует*, что оно материально, доказывается при рассмотрении явлений, происходящих при ускоренном движении электрических зарядов. Этот вопрос будет рассмотрен в 11 классе при изучении электромагнитных волн. Здесь мы остановимся только на одном факте.

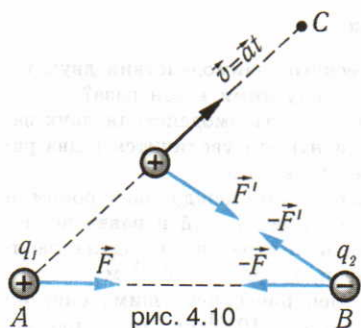


рис. 4.10

Пока электрические заряды q_1 и q_2 неподвижны и находятся в точках A и B , на заряд q_2 со стороны заряда q_1 действует сила $-\vec{F}$, направленная вдоль прямой BA (рис. 4.10). Если в некоторый момент времени t заряд q_1 начинает двигаться из точки A к точке C , то модуль и направление силы, действующей на заряд q_2 , должны измениться. Согласно представлению

теории дальнего действия эти изменения должны были бы происходить мгновенно, т. е. в любой момент времени кулоновская сила должна быть направлена вдоль прямой, соединяющей заряды.

Однако в действительности наблюдается другая картина. Если в некоторый момент времени t заряд q_1 выходит из состояния покоя и движется ускоренно, то изменение силы, действующей со стороны заряда q_1 на заряд q_2 , наблюдается лишь через промежуток времени Δt , определяемый выражением $\Delta t = l/c$, где l — расстояние между зарядами; $c = 3,0 \cdot 10^8$ м/с — скорость света в вакууме. Запаздывание изменений взаимодействия электрических зарядов при их ускоренном движении доказывает справедливость теории близкого действия, согласно которой взаимодействие электрических зарядов осуществляется с помощью электромагнитного поля. С этой скоростью распространяются любые изменения в электрическом поле при ускоренном движении электрических зарядов.

Запаздывание изменений в электрическом поле на расстояниях в несколько метров обнаружить довольно трудно из-за большого значения скорости света. В космонавтике же эти запаздывания не только легко обнаружить, но они создают определенные дополнительные трудности в управлении космическими аппаратами. Так, при управлении луноходом команды, отправленные антеннами радиопередатчиков с пункта космической связи, достигали приемных антенн лунохода лишь через 1,3 с после отправления, так как расстояние от Земли до Луны составляет примерно 400 000 км. При осуществлении посадки на поверхность планеты Венера автоматические космические станции «Венера» получали команды с Земли спустя 3,5 мин после их отправления, так как расстояние между Землей и Венерой превышало 60 млн км.

Напряженность электрического поля. Физическая величина, равная отношению силы $\vec{F}$, с которой электрическое поле действует на пробный точечный заряд q , к значению

этого заряда, называется *напряженностью электрического поля* и обозначается символом $\vec{E}$:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}. \quad (40.1)$$

Для модуля вектора напряженности получим

$$E = \frac{|Q|}{4\pi\epsilon_0 r^2}. \quad (40.2)$$

Заряд Q называется обычно источником поля, заряд q — пробным зарядом.

Напряженность электрического поля точечного заряда прямо пропорциональна модулю заряда источника поля Q и обратно пропорциональна квадрату расстояния от источника до данной точки поля.

За направление вектора напряженности электрического поля принимается направление вектора кулоновской силы, действующей на пробный положительный электрический заряд, помещенный в данную точку поля.

Выражение (40.1) позволяет найти единицу напряженности электрического поля — это 1 Н/Кл. Единицей СИ напряженности электрического поля служит 1 В/м. В § 43 мы покажем, что 1 В/м = 1 Н/Кл.

Зная напряженность электрического поля $\vec{E}$ в данной точке поля, можно определить модуль и направление вектора силы, с которой электрическое поле будет действовать на любой электрический заряд q в этой точке:

$$\vec{F} = \vec{E}q. \quad (40.3)$$

Опыт показывает, что если на электрический заряд q действуют одновременно электрические поля нескольких источников, то результирующая сила оказывается равной геометрической сумме сил, действующих со стороны каждого поля в отдельности. Это свойство электрических полей означает, что они подчиняются *принципу суперпозиции*: если в данной точке пространства различные заряженные частицы создают электрические поля с напряженностями $\vec{E}_1$, $\vec{E}_2$ и т. д., то вектор напряженности результирующего электрического поля равен сумме векторов напряженностей всех электрических полей:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n. \quad (40.4)$$

Справедливость принципа суперпозиции для взаимодействия электрических зарядов показывает, что электрические поля различных источников существуют в одной и той же точке пространства и действуют на электрические заряды независимо друг от друга.

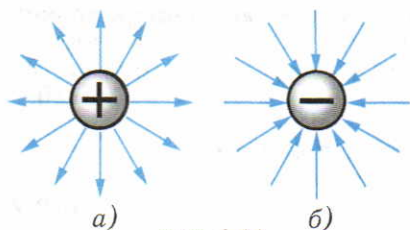


рис. 4.11

Линии напряженности электрического поля. Линией напряженности электрического поля называется линия, касательная к которой в каждой точке направлена вдоль вектора напряженности $\vec{E}$.

Линии напряженности электрического поля начинаются на положительных электрических зарядах и кончаются на отрицательных электрических зарядах. Они могут также уходить в бесконечность от положительных зарядов и приходить из бесконечности к отрицательным зарядам.

Распределение линий напряженности вокруг уединенных точечных зарядов показано на рисунке 4.11, а, б.

Определяя направление вектора $\vec{E}$ в различных точках пространства, можно представить картину распределения линий напряженности электрического поля от разных источников. Для двух разноименных зарядов эта картина имеет вид, показанный на рисунке 4.12, а, для одноименных — на рисунке 4.12, б.

Однородное электрическое поле. Электрическое поле, в котором напряженность одинакова по модулю и направлению в любой точке пространства, называется *однородным* электрическим полем.

Приблизительно однородным является электрическое поле между двумя разноименно заряженными плоскими металли-

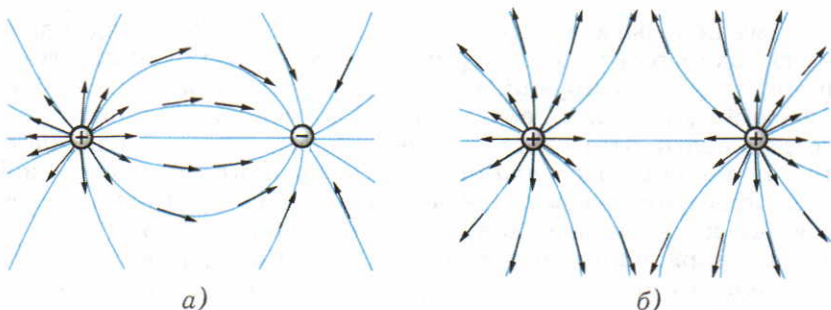


рис. 4.12

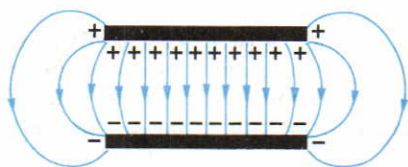


рис. 4.13

ческими пластинами, если расстояние между ними значительно меньше их размеров. Линии напряженности в однородном электрическом поле параллельны друг другу (рис. 4.13).

Вопросы

1. Как объясняет взаимодействие электрических зарядов теория поля? 2. Какие опытные факты доказывают справедливость теории поля? 3. В чем заключается принцип суперпозиции полей? 4. Зависит ли напряженность поля от пробного заряда, помещенного в данную точку поля? от заряда, создающего поле? 5. Что называется линией напряженности электрического поля? 6. Будет ли заряженное тело, помещенное в электрическое поле, обязательно двигаться по линиям напряженности этого поля, если никакие другие силы, кроме электростатических, на него не действуют? 7. Могут ли линии напряженности электростатического поля касаться друг друга или пересекаться?

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1. Вычислите напряженность электрического поля в точке A , находящейся на прямой, проходящей через два положительных точечных электрических заряда q_1 и q_2 , расположенные в точках B и C ; $q_1 = 10^{-10}$ Кл, $q_2 = 2 \cdot 10^{-10}$ Кл, $AB = 3$ см, $BC = 9$ см. Рассмотрите все возможные случаи расположения точки A по отношению к точкам B и C .

Решение. Напряженность $\vec{E}_A$ электрического поля в точке A равна: $\vec{E}_A = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$, где $\vec{E}_1$ и $\vec{E}_2$ — напряженности полей, создаваемых в точке A зарядами q_1 и q_2 . Модули напряженностей $\vec{E}_1$ и $\vec{E}_2$ соответственно равны: $E_1 = \frac{|q_1|}{4\pi\epsilon_0 r_1^2}$, $E_2 = \frac{|q_2|}{4\pi\epsilon_0 r_2^2}$, где $r_1 = AB$; $r_2 = AC$; $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9$ Н·м²/Кл².

По условию задачи возможны два случая. В первом случае точка A находится между точками B и C (рис. 4.14, а). Тогда $r_1 = AB = 3 \cdot 10^{-2}$ м; $r_2 = AC = 9 \cdot 10^{-2}$ м — $3 \cdot 10^{-2}$ м = $6 \cdot 10^{-2}$ м и для E_1 и E_2 соответственно имеем:

$$E_1 = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 10^{-10}}{9 \cdot 10^{-4}} \text{ Н/Кл} = 10^3 \text{ Н/Кл},$$

$$E_2 = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 2 \cdot 10^{-10}}{36 \cdot 10^{-4}} \text{ Н/Кл} = 5 \cdot 10^2 \text{ Н/Кл}.$$

Векторы $\vec{E}_1$ и $\vec{E}_2$ направлены противоположно, по модулю вектор $\vec{E}_1$ больше вектора $\vec{E}_2$. Поэтому вектор $\vec{E}_A$ направлен от B к A и модуль его равен: $E_A = E_1 - E_2$; $E_A = 10^3 \text{ Н/Кл} - 5 \cdot 10^2 \text{ Н/Кл} = 5 \cdot 10^2 \text{ Н/Кл}$.

Во втором случае точки A и C находятся по разные стороны от точки B (рис. 4.14, б). В этом случае $r_1 = AB = 3 \cdot 10^{-2}$ м;

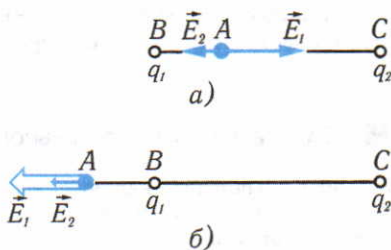


рис. 4.14

$$r_2 = AC = AB + BC = 3 \cdot 10^{-2} \text{ м} + 9 \cdot 10^{-2} \text{ м} = 12 \cdot 10^{-2} \text{ м}. \quad E_1 = 10^3 \text{ Н/Кл},$$

$$E_2 = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 2 \cdot 10^{-10}}{144 \cdot 10^{-4}} \text{ Н/Кл} \approx 0,125 \cdot 10^3 \text{ Н/Кл}.$$

Векторы $\vec{E}_1$ и $\vec{E}_2$ направлены в одну сторону: $E_A = E_1 + E_2 = 10^3 \text{ Н/Кл} + 0,125 \cdot 10^3 \text{ Н/Кл} = 1,125 \cdot 10^3 \text{ Н/Кл}.$

Задача 2. Найдите напряженность электрического поля, созданного двумя разноименными зарядами $|Q_1| = |Q_2| = Q$, находящимися на расстоянии $2l$ друг от друга (такая система зарядов называется диполем), в точке, равноудаленной от этих зарядов. Расстояние от этой точки до линии, соединяющей заряды, равно r .

Решение. Напряженность $\vec{E}$ в искомой точке находится как векторная сумма напряженностей электростатических полей, создаваемых обоими зарядами в данной точке (рис. 4.15).

Модули напряженностей электростатических полей, создаваемых этими зарядами, равны:

$$E_1 = E_2 = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 (r^2 + l^2)}.$$

Модуль E суммарной напряженности в исследуемой точке равен:

$$E = 2 E_1 \cos \alpha,$$

где

$$\cos \alpha = \frac{l}{\sqrt{r^2 + l^2}}.$$

Подставив значение E_1 и $\cos \alpha$ в выражение для E , получим

$$E = \frac{2Q}{4\pi\epsilon_0 (r^2 + l^2)} \cdot \frac{l}{\sqrt{r^2 + l^2}} = \frac{Ql}{2\pi\epsilon_0 (r^2 + l^2)^{3/2}}.$$

Анализ полученной формулы показывает, что на расстоянии $r \gg l$ выражение для E можно записать в виде

$$E = \frac{Ql}{2\pi\epsilon_0 r^3}.$$

Таким образом, мы показали, что напряженность поля диполя уменьшается с ростом расстояния от него обратно пропорционально кубу расстояния, т. е. быстрее, чем напряженность поля точечного заряда.

■ Задачи для самостоятельного решения

40.1. Вычислите напряженность электростатического поля на первой орбите атома водорода. Радиус орбиты равен $5 \cdot 10^{-11}$ м, ядром атома водорода является протон.

40.2. На точечный электрический заряд $5 \cdot 10^{-10}$ Кл электрическое поле действует с силой 10^{-7} Н. Определите напряженность электрического поля.

40.3. Вычислите напряженность электрического поля в точке A , находящейся вне зарядов на прямой, проходящей через два одноименных точечных электрических заряда, расположенные в точках B и C ; $q_B = 10^{-9}$ Кл, $q_C = 5 \cdot 10^{-10}$ Кл, $AB = 5$ см, $BC = 10$ см.

40.4. Напряженность поля на расстоянии 30 см от точечного заряда равна 900 Н/Кл. Чему равна напряженность поля на расстоянии 10 см от этого заряда?

40.5. Используя закон Кулона, докажите, что на заряд, помещенный внутрь равномерно заряженной сферы, не действуют электрические силы.

40.6. Водяная капля имеет электрический заряд, равный одному элементарному заряду (заряду электрона). Определите массу, радиус капли и число молекул воды в ней, если известно, что действие силы тяжести на каплю уравнивается действием электрического поля Земли. Напряженность электрического поля Земли равна 130 Н/Кл, вектор напряженности направлен к центру Земли.

§ 41 Теорема Гаусса

Поток вектора напряженности. Введем еще одну физическую величину, характеризующую электрическое поле, — *поток вектора напряженности*. С помощью этой величины мы сможем рассчитать напряженности электрических полей, источниками которых являются не только точечные заряды, но и заряды, распределенные непрерывно по некоторым поверхностям — плоскости, сфере, цилиндру и т. д.

Элементарным потоком вектора напряженности через малую площадку называется произведение модуля вектора $\vec{E}$ на площадь площадки ΔS и косинус угла между вектором $\vec{E}$ и нормалью к площадке $\vec{n}_0$ (рис. 4.16):

$$\Delta \Phi = E \Delta S \cos \alpha. \quad (41.1)$$

Заметим, что если поверхность замкнутая, то выбирается внешняя нормаль к ней.

Полный поток через поверхность равен сумме элементарных потоков через все ее участки:

$$\Phi = \sum \Delta \Phi = \sum E \Delta S \cos \alpha. \quad (41.2)$$

Чтобы вычислить значение полного потока, оказывается полезным ввести еще одно вспомогательное понятие — *телесный угол*.

Мерой телесного угла Ω (рис. 4.17) служит отношение площади поверхности шарового сегмента S_0 к квадрату радиуса:

$$\Omega = S_0 / r^2. \quad (41.3)$$

Единицей телесного угла является стерадиан (сокращенно: ср) — это телесный угол с вершиной в центре сферы, вырезающий

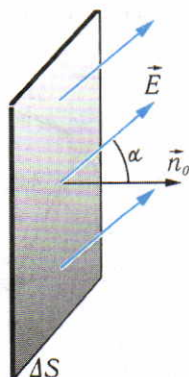


рис. 4.16

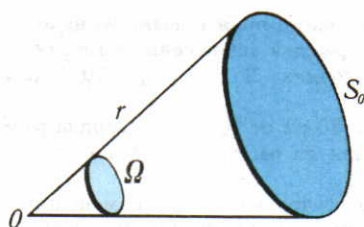


рис. 4.17

на поверхности сферы элемент, площадь которого равна квадрату радиуса. Итак, $\Omega = 1$ ср, если $S_0 = r^2$.

Нетрудно убедиться, что полный телесный угол вокруг точки равен 4π ср. В самом деле, поверхность сферы равна $4\pi r^2$, следовательно, $\Omega_{\text{полн}} = 4\pi r^2 / r^2 = 4\pi$ ср.

Теорема Гаусса. Вернемся к выражению для элементарного потока (41.1). Пусть электрическое поле создается точечным зарядом q , тогда модуль вектора напряженности $E = q / (4\pi r^2)$. Подставив в формулу (41.1), получим

$$\Delta\Phi = E \Delta S \cos \alpha = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{\Delta S \cos \alpha}{r^2}.$$

Как видно из рисунка 4.18, а, $\Delta S \cos \alpha = \Delta S_0$, при этом площадка площадью ΔS_0 перпендикулярна радиусу. Тогда

$$\Delta\Phi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{\Delta S_0}{r^2} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \Delta\Omega. \quad (41.4)$$

Теперь уже нетрудно получить выражение для полного потока вектора $\vec{E}$ через произвольную замкнутую поверхность:

$$\Phi = \sum \Delta\Phi = \sum \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \Delta\Omega = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \sum \Delta\Omega = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} 4\pi = q / \epsilon_0.$$

Таким образом, если точечный заряд расположен внутри произвольной замкнутой поверхности, то полный поток вектора напряженности через эту поверхность равен:

$$\Phi = q / \epsilon_0. \quad (41.5)$$

Обращаем внимание читателя на тот факт, что этот ре-

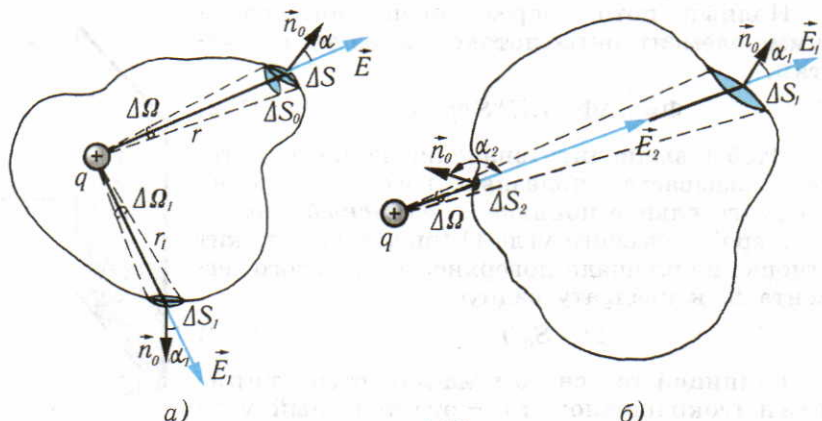


рис. 4.18

зультат не зависит ни от формы поверхности, ни от того, где внутри поверхности расположен заряд.

Осталось рассмотреть случай, когда заряд находится вне замкнутой поверхности. Нетрудно убедиться, что поток в этом случае равен нулю. В самом деле (см. рис. 4.18, б), элементарные потоки $\Delta\Phi_1$ и $\Delta\Phi_2$ через площадки ΔS_1 и ΔS_2 по модулю равны, ибо они вписаны в один и тот же телесный угол $\Delta\Omega$ (см. 4.1.4). Однако знаки этих потоков противоположны, так как угол α_1 острый и $\cos\alpha_1 > 0$, а угол α_2 тупой и $\cos\alpha_2 < 0$.

Итак, сумма этих двух элементарных потоков равна нулю. То же будет справедливо и для всех других участков замкнутой поверхности. Следовательно, если заряд расположен вне замкнутой поверхности, то поток вектора напряженности от этого источника равен нулю.

Если же внутри поверхности расположен не один точечный заряд, а их совокупность или если заряд распределен по некоторой поверхности или в некотором объеме, то выражение (4.1.5) легко обобщается (на основе принципа суперпозиции; см. с. 20 и 209):

$$\Phi = \frac{1}{\epsilon_0} \sum q_{\text{внутр}}. \quad (4.1.6)$$

Это и есть *теорема Гаусса*: поток вектора напряженности через произвольную замкнутую поверхность равен алгебраической сумме зарядов, расположенных внутри этой поверхности, деленной на электрическую постоянную.

Используя теорему Гаусса, можно вычислить напряженность электрического поля вокруг заряженного тела при условии наличия какой-либо симметрии, например симметрии относительно центра, плоскости или оси.

Напряженность поля заряженной плоскости. Применим теорему Гаусса для определения напряженности электрического поля заряженной плоскости. Если плоскость бесконечна и заряжена равномерно, т. е. *поверхностная плотность заряда* $\sigma = Q/S$ одинакова в любом ее месте, то линии напряженности электрического поля в любой точке перпендикулярны этой плоскости. Такое же направление они сохраняют и на любом расстоянии от плоскости, т. е. поле заряженной плоскости однородное.

Для нахождения напряженности электрического поля заряженной плоскости мысленно выделим в пространстве цилиндр, ось которого перпендикулярна заряженной плоскости, а основания параллельны ей и одно из оснований проходит через интересующую нас точку поля. Цилиндр вырезает из заряженной плоскости участок площадью S , и такую же площадь имеют основания цилиндра, расположенные по разные стороны от плоскости (рис. 4.19).

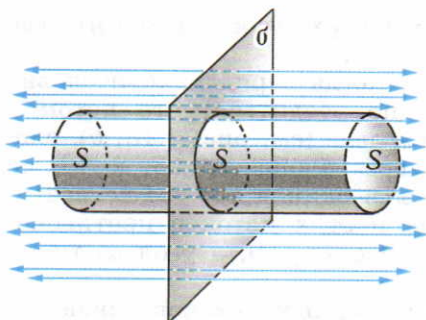


рис. 4.19

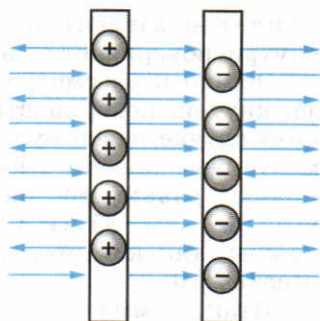


рис. 4.20

Согласно теореме Гаусса поток Φ вектора напряженности электрического поля через поверхность цилиндра связан с электрическим зарядом внутри цилиндра выражением

$$\Phi = \frac{Q}{\epsilon_0} = \frac{\sigma S}{\epsilon_0}.$$

С другой стороны, так как линии напряженности пересекают лишь основания цилиндра, поток вектора напряженности можно выразить через напряженность электрического поля у обоих оснований цилиндра:

$$\Phi = 2ES.$$

В самом деле, поток через боковую поверхность цилиндра (см. рис. 4.19), согласно выражению (41.2), равен нулю, поскольку $\alpha = 90^\circ$ и $\cos \alpha = 0$.

Из двух выражений для потока вектора напряженности получим

$$2ES = \frac{\sigma S}{\epsilon_0},$$

откуда

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}. \quad (41.7)$$

Напряженность электрического поля между разноименно заряженными пластинами. Если размеры пластин значительно превосходят расстояние между ними, то электрическое поле каждой из пластин можно считать близким к полю бесконечной равномерно заряженной плоскости. Так как линии напряженности электрического поля разноименно заряженных пластин между ними направлены в одну сторону (рис. 4.20), то напряженность поля между пластинами равна:

$$E = E_1 + E_2 = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} + \frac{\sigma}{2\epsilon_0} = \frac{\sigma}{\epsilon_0}. \quad (41.8)$$

Так как

$$\sigma = \frac{Q}{S},$$

где Q — заряд одной пластины; S — ее площадь, то

$$E = \frac{Q}{S\epsilon_0}. \quad (41.9)$$

Во внешнем пространстве линии напряженности электрического поля разноименно заряженных пластин имеют противоположные направления, поэтому вне этих пластин результирующая напряженность электрического поля практически равна нулю (см. рис. 4.20).

Выражения (41.7) и (41.9) справедливы для больших заряженных пластин, когда напряженность определяется в точке, расположенной далеко от их краев.

■ ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1. Используя теорему Гаусса, найдите зависимость напряженности электрического поля равномерно заряженной тонкой проволоки бесконечной длины от расстояния r до оси проволоки.

Решение. Выделим участок проволоки конечной длины l . Если линейная плотность заряда на проволоке $\tau = q/l$, то заряд выделенного участка равен: $q = \tau l$.

Из соображений симметрии электрическое поле проволоки изобразим линиями напряженности, расходящимися перпендикулярно поверхности проволоки (рис. 4.21).

Окружим этот участок цилиндрической поверхностью радиусом r таким образом, чтобы ось цилиндра совпадала с осью проволоки (см. рис. 4.21). При этом весь поток вектора напряженности будет выходить через боковую поверхность цилиндра, площадь которой $S = 2\pi r l$, так как поток через оба основания цилиндра равен нулю. В этом случае из выражений (41.2) и (41.5) следует: $\Phi = E 2\pi r l = \frac{\tau l}{\epsilon_0}$, откуда

$$E = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0 r}.$$

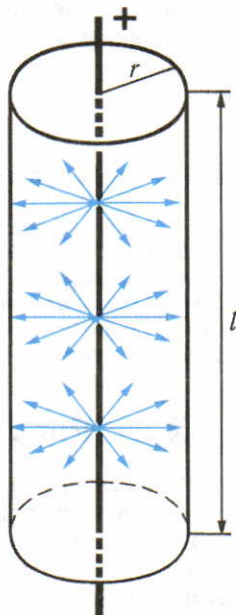


рис. 4.21

Анализ этой формулы показывает, что напряженность электрического поля тонкой, равномерно заряженной, бесконечно длинной и прямой проволоки обратно пропорциональна расстоянию от нее.

Задача 2. Используя теорему Гаусса, определите зависимость напряженности электростатического поля равномерно заряженной сферической поверхности радиусом R от расстояния r до центра сферы. Заряд на сфере равен q .

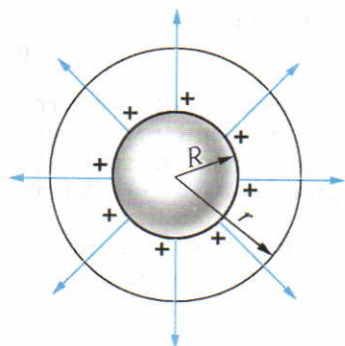


рис. 4.22

Решение. Линии напряженности электрического поля, создаваемого сферой, расходятся радиально. Окружим заряженную сферу сферической поверхностью радиусом $r > R$ (рис. 4.22). Поток вектора напряженности через сферическую поверхность равен:

$$\Phi = 4\pi r^2 E.$$

На основании теоремы Гаусса получим $4\pi r^2 E = \frac{q}{\epsilon_0}$, откуда

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2}.$$

Анализ этой формулы показывает, что электростатическое поле вне равномерно заряженной сферы не отличается от поля точечного заряда, если заряд сферы поместить в ее центре.

Можно доказать, что напряженность электрического поля в любой точке внутри равномерно заряженной сферы равна нулю.

■ Задачи для самостоятельного решения

41.1. Напряженность электрического поля у поверхности Земли равна 130 Н/Кл. Оцените электрический заряд земного шара.

41.2. Напряженность электрического поля у поверхности бесконечно длинного цилиндрического проводника радиусом 1 см равна 10 Н/Кл. Какой заряд находится на участке провода длиной 1 м? Какова напряженность электрического поля на расстоянии 40 см от оси цилиндра?

§ 42 Работа сил электрического поля

Работа сил электрического поля при перемещении электрического заряда. В § 10 было показано, что при перемещении тела между двумя точками в гравитационном поле работа силы тяжести не зависит от формы траектории его движения. Силы гравитационного и электрического взаимодействия имеют одинаковую зависимость от расстояния, векторы гравитационных и кулоновских сил при взаимодействии точечных тел направлены по прямой, соединяющей взаимодействующие тела. Следовательно, при перемещении заряда в электростатическом поле из одной точки в другую работа сил электрического поля не зависит от формы траектории.

Работа электростатических (кулоновских) сил по любой замкнутой траектории равна нулю.

Работа в однородном поле. Независимость работы сил электростатического поля от формы траектории движения заряда

между двумя точками однородного поля можно доказать следующим способом. Пусть в однородном электрическом поле напряженностью $\vec{E}$ электрический заряд q перемещается из точки B в точку D (рис. 4.23). Если заряд двигался по прямой BD , то работа электрического поля равна:

$$A = Fs \cos \alpha = qEd,$$

где s — модуль вектора перемещения; α — угол между направлениями вектора кулоновской силы $\vec{F} = q\vec{E}$ и вектора перемещения заряда $\vec{s}$.

Если заряд из точки B сначала двигался по прямой в точку C , а затем по прямой из точки C в точку D , то работа сил электрического поля равна:

$$A'_2 = A_{BC} + A_{CD} = qE \cdot BC \cos 0^\circ + qE \cdot CD \cos 90^\circ = qEd.$$

Мы видим, что работа сил однородного электрического поля при перемещении электрического заряда по прямой BD и по ломаной BCD одинакова и равна произведению электрического заряда на напряженность электрического поля E и расстояние $BC = d$, на которое переместился заряд вдоль линии напряженности электрического поля:

$$A = qEd. \quad (42.1)$$

Любую линию, соединяющую точки B и D в однородном электрическом поле, можно приблизительно представить состоящей из последовательных отрезков, расположенных параллельно и перпендикулярно линиям напряженности (рис. 4.24). Применяя такие же рассуждения для каждого участка траектории, получим, что выражение (42.1) пригодно для вычисления работы сил однородного электрического поля при движении заряда по любой траектории.

При изменении направления перемещения работа сил электрического поля, как и работа силы тяжести, изменяет знак на противоположный. Если при перемещении заряда q из точки B в точку D силы электрического поля совершили работу A , то при перемещении этого заряда по тому же самому пути из точки D в точку B они совершают работу $-A$. Но так как работа

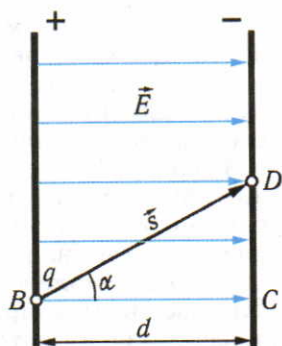


рис. 4.23

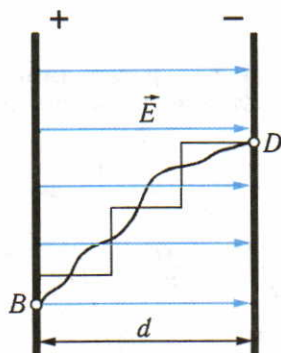


рис. 4.24

не зависит от формы траектории, то и при перемещении по любой другой траектории тоже совершается работа $-A$. Отсюда следует, что при перемещении заряда по замкнутой траектории суммарная работа сил электростатического поля оказывается равной нулю.

Поле, работа сил которого по любой замкнутой траектории равна нулю, называется *потенциальным* (консервативным) полем. Гравитационное и электростатическое поля являются потенциальными полями.

Работа в поле точечного заряда. Определим работу, которая совершается при перемещении пробного заряда в электрическом поле, источником которого является положительный заряд Q (рис. 4.25). Пусть положительный пробный заряд q находится сначала в точке M на расстоянии r_1 , а затем оказывается в точке N на расстоянии r_2 от источника поля Q . Допустим также, что заряд двигался вначале вдоль радиуса по прямой MK , а затем по дуге KN окружности радиусом r_2 . Тогда работа по перемещению заряда из точки M в точку N равна сумме работ на участках MK и KN :

$$A_{MN} = A_{MK} + A_{KN}. \quad (42.2)$$

Очевидно, что работа по перемещению заряда по дуге равна нулю. В самом деле, здесь сила $F = qQ/(4\pi\epsilon_0 r_2^2) = \text{const}$, а угол между векторами силы и перемещения $\alpha = 90^\circ$. Итак, $A_{KN} = Fl \cos \alpha = Fl \cos 90^\circ = 0$. Остается найти работу, совершаемую полем при перемещении пробного заряда вдоль радиуса, т. е. вдоль линии напряженности.

Трудность этой задачи заключается в том, что в каждой точке пути сила $\vec{F}$, действующая на заряд со стороны электрического поля, принимает новое значение, т. е. это не постоянная, а переменная величина. Однако на очень малом отрезке пути Δr вдоль линии напряженности элементарную работу ΔA сил электрического поля можно принять равной

$$\Delta A = F \Delta r = \frac{Qq}{4\pi\epsilon_0 r^2} \Delta r, \quad (42.3)$$

где r — расстояние от источника поля до отрезка Δr . Работу сил электрического поля при перемещении пробного заряда q из точки M , расположенной на расстоянии r_1 от заряда Q , в точку K , расположенную на расстоянии r_2 , можно найти как сумму элементарных работ на малых отрезках пути:

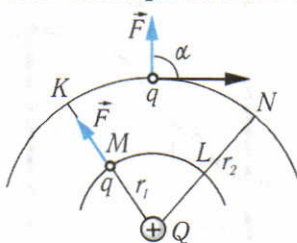


рис. 4.25

$$A_{MK} = \sum_{r_1}^{r_2} \Delta A_i = \sum_{r_1}^{r_2} F_i \Delta r_i.$$

Операция нахождения такой суммы

при переходе к бесконечно малым значениям перемещения называется интегрированием. Интегрирование в данном случае дает следующий результат:

$$A_{MK} = \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0 r_1} - \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0 r_2}. \quad (42.4)$$

Можно доказать, что если пробный заряд будет перемещаться по другой траектории, например по пути MLN , то результат окажется таким же. Итак, мы пришли к выводу, что поле точечного заряда является консервативным (потенциальным) и работа по перемещению пробного заряда по произвольной траектории не зависит от формы траектории и определяется лишь положениями начальной и конечной точек:

$$A_{12} = \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0 r_1} - \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0 r_2}. \quad (42.5)$$

Работа и потенциальная энергия. В механике (§ 10) мы говорили, что если работа не зависит от формы траектории, иными словами, если поле сил консервативное, то работу можно представить как разность потенциальных энергий в начале и конце траектории:

$$A = W_{p_1} - W_{p_2}. \quad (42.6)$$

(Мы будем в электростатике энергию обозначать буквой W , а не E , поскольку буквой E мы обозначаем напряженность поля.) Сравнивая выражения (42.5) и (42.6), мы видим, что потенциальная энергия взаимодействия точечных зарядов равна:

$$W_p = \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0 r} + \text{const.} \quad (42.7)$$

Как и в общем случае, потенциальная энергия взаимодействия зарядов определяется с точностью до произвольного постоянного слагаемого, значение которого можно задать так, чтобы упростить решение задачи. Напомним, что точно так же обстоит дело с потенциальной энергией гравитационного взаимодействия.

■ Вопросы

1. Какие поля называются консервативными (потенциальными)?
2. Чему равна работа электрического поля при перемещении пробного заряда по замкнутой траектории?
3. Докажите, что однородное электрическое поле является консервативным.
4. Чему равна работа электрического поля точечного заряда при перемещении пробного заряда из одной точки поля в другую?
5. Докажите, что электрическое поле точечного заряда является консервативным.
6. Чему равна потенциальная энергия взаимодействия двух точечных зарядов?

■ Задачи для самостоятельного решения

42.1. Согласно классической модели атома водорода, электрон обращается вокруг протона на расстоянии $r = 5,3 \cdot 10^{-11}$ м. Определите кинетическую энергию электрона, его потенциальную и полную энергию. Какой смысл имеет отрицательное значение потенциальной и полной энергии? На бесконечно большом расстоянии между электроном и протоном потенциальная энергия принимается равной нулю.

42.2. Между двумя бесконечно длинными параллельными плоскими пластинами создано электрическое поле напряженностью $E = 10^4$ Н/Кл. Расстояние между пластинами равно 20 мм. Из отрицательно заряженной пластины вылетел электрон с начальной скоростью, близкой к нулю. Какова будет его скорость, когда он долетит до положительно заряженной пластины?

42.3. На шарике радиусом 5 см находится электрический заряд $5 \cdot 10^{-5}$ Кл. Какова собственная энергия поля этого заряда?

42.4. Две бесконечно длинные параллельные плоские пластины заряжены разноименными зарядами с поверхностной плотностью $6 \cdot 10^{-4}$ Кл/м². Расстояние между пластинами равно 1,5 см. Определите работу, которую совершает поле, перемещая заряд $2,5 \cdot 10^{-6}$ Кл с одной пластины на другую.

§ 43 Потенциал электрического поля

Потенциал. В предыдущем параграфе мы на примере двух полей — однородного поля и поля точечного заряда — доказали, что электростатическое поле является консервативным (потенциальным) и работа по перемещению заряда равна разности потенциальных энергий в начале и конце траектории [см. формулу (42.6)]. Аналогично тому как в § 40 была введена силовая характеристика электрического поля — его напряженность, введем энергетическую характеристику электрического поля — *потенциал*:

$$\varphi = W_p/q. \quad (43.1)$$

Потенциалом электрического поля в данной точке называется отношение потенциальной энергии, которой обладает пробный заряд, помещенный в данную точку поля, к этому заряду.

Работа и разность потенциалов. Поскольку потенциальная энергия определяется лишь с точностью до произвольной постоянной, зависящей от выбора нулевого уровня, то это справедливо и для потенциала. Однако работа не зависит от этой произвольной постоянной, поскольку она определяется разностью потенциальных энергий. Сопоставив выражения (42.6) и (43.1), получим

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2). \quad (43.2)$$

Работа по перемещению электрического заряда между двумя точками поля равна произведению заряда на разность потенциалов начальной и конечной точек.

Единица потенциала. В Международной системе единиц единицей потенциала (естественно, и разности потенциалов) служит вольт (В). 1 В — это разность потенциалов двух точек электрического поля, при перемещении между которыми заряда 1 Кл поле совершает работу 1 Дж.

Согласно выражению (43.2)

$$1 \text{ В} = 1 \text{ Дж} / 1 \text{ Кл}.$$

Потенциал поля точечного заряда. Сравнив выражения (42.7) и (43.1), получим выражение для потенциала поля точечного заряда:

$$\varphi = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r} + \text{const.} \quad (43.3)$$

Потенциал определен лишь с точностью до произвольной постоянной, зависящей от выбора нулевого уровня потенциала. Обычно полагают равным нулю потенциал поля в точке, удаленной бесконечно далеко от точечного источника поля; т. е. при $r \rightarrow \infty$ потенциал $\varphi \rightarrow 0$. Это означает, что при данном условии $\text{const} = 0$, тогда выражение для потенциала поля точечного заряда имеет вид

$$\varphi = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r}. \quad (43.4)$$

Эквипотенциальные поверхности. Поверхность, во всех точках которой потенциал электрического поля имеет одинаковые значения, называется *эквипотенциальной поверхностью*.

Между двумя любыми точками на эквипотенциальной поверхности разность потенциалов равна нулю, поэтому работа сил электрического поля при любом перемещении заряда по эквипотенциальной поверхности равна нулю. Это означает, что вектор силы $\vec{F}$ в любой точке траектории при движении заряда по эквипотенциальной поверхности перпендикулярен вектору перемещения. Следовательно, линии напряженности электростатического поля перпендикулярны эквипотенциальной поверхности. В самом деле, $\Delta A = F \Delta l \cos \alpha$. Если $\Delta A = 0$ при $F \neq 0$ и $l \neq 0$, то $\cos \alpha = 0$, следовательно, $\alpha = 90^\circ$.

Эквипотенциальными поверхностями поля точечного заряда являются сферы, в центре которых расположен заряд.

Эквипотенциальные поверхности однородного электрического поля представляют собой плоскости, перпендикулярные линиям напряженности. Эквипотенциальные поверхности поля двух одноименных точечных зарядов представлены на рисунке 4.26.

Связь между напряженностью и разностью потенциалов. Установить эту связь для неоднородного поля можно, используя представление об эквипотенциальных поверхностях.

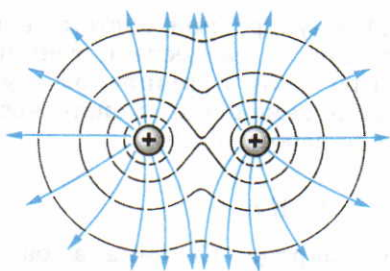


рис. 4.26

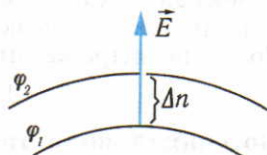


рис. 4.27

Рассчитаем работу, совершаемую электрическим полем при перемещении электрического заряда с одной эквипотенциальной поверхности на соседнюю по направлению нормали к этой поверхности (рис. 4.27). Если расстояние между поверхностями по нормали Δn настолько мало, что на этом участке можно считать поле однородным, то можем записать выражение для элементарной работы через напряженность поля и расстояние между эквипотенциальными поверхностями:

$$\Delta A = qE\Delta n.$$

С другой стороны, согласно формуле (43.2) работа поля по перемещению заряда из точки с потенциалом $\varphi_1 = \varphi$ до точки с потенциалом $\varphi_2 = \varphi + \Delta\varphi$ равна:

$$\Delta A = q(\varphi_1 - \varphi_2) = -q\Delta\varphi.$$

Приравнявая эти выражения для работы, получим

$$E = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta n}. \quad (43.5)$$

В однородном поле Δn может быть любым. Если $\Delta n = d$, то

$$E = -\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d} = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{d}. \quad (43.6)$$

Из (43.6) следует, что единицей напряженности электрического поля в СИ является 1 В/м.

Потенциал поля системы зарядов. Потенциал — величина скалярная. Если в некоторой точке пространства двумя зарядами (источниками поля) одновременно созданы электрические поля с потенциалами φ_1 и φ_2 , то потенциал результирующего электрического поля равен алгебраической сумме потенциалов φ_1 и φ_2 :

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2. \quad (43.7)$$

Аналогичным способом можно найти потенциал электрического поля, созданного любым числом дискретных электрических зарядов, а также зарядом, распределенным на некоторой поверхности.

Электрическое напряжение. При перемещении электрического заряда в любом электрическом поле силы электрического поля совершают работу. Отношение работы A сил электрического поля к электрическому заряду q при его перемещении из одной точки в другую называется *электрическим напряжением*. Электрическое напряжение обозначается буквой U :

$$U = \frac{A}{q}. \quad (43.8)$$

Сравнивая выражения (43.2) и (43.8), можно сделать вывод о том, что в электростатическом поле разность потенциалов между двумя точками равна напряжению между ними:

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2. \quad (43.9)$$

Однако понятия «напряжение» и «разность потенциалов» не тождественны друг другу. Если перемещение электрического заряда происходит в непотенциальном электрическом поле, то задавать вопрос о напряжении между двумя точками имеет смысл, а задавать вопрос о разности потенциалов бессмысленно.

Единица электрического напряжения совпадает с единицей разности потенциалов в Международной системе единиц — 1 вольт (В).

■ Вопросы

1. Какие общие закономерности имеют место в законах гравитационного и электростатического взаимодействия? 2. Что называется потенциалом электрического поля? 3. Как связана потенциальная энергия электрического заряда в электростатическом поле с потенциалом поля? 4. Как связана работа при перемещении заряда в электростатическом поле с потенциалами начальной и конечной точек траектории? 5. Что такое эквипотенциальная поверхность? 6. Как расположены линии напряженности электрического поля по отношению к эквипотенциальным поверхностям? 7. Каково соотношение между напряженностью и потенциалом электростатического поля?

■ Примеры решения задач

Задача 1. В кинескопе телевизора электроны ускоряются электрическим полем. Какую работу совершает электрическое поле при ускорении электрона, если разность потенциалов между начальной и конечной точками равна 10 кВ? Какую скорость приобретает электрон в конце пути?

Решение. Работа электрического поля равна: $A = q(\varphi_1 - \varphi_2)$. Можно считать, что на электрон в кинескопе действуют только кулоновские силы, так как действием других сил можно пренебречь. В этом случае изменение кинетической энергии электрона равно работе сил электрического поля: $\Delta W_k = A = q(\varphi_1 - \varphi_2)$.

Начальную скорость электрона можно считать равной нулю, поэтому кинетическая энергия электрона в конце пути $\frac{mv^2}{2} = q(\varphi_1 - \varphi_2)$. Из последнего уравнения можно получить выражение для скорости электрона в конце пути: $v = \sqrt{\frac{2q(\varphi_1 - \varphi_2)}{m}}$.

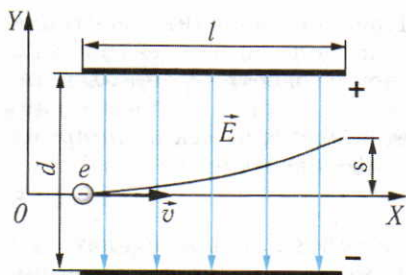


рис. 4.28

Выполнив расчеты, получим

$$A = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 10^4 \text{ В} = 1,6 \cdot 10^{-15} \text{ Дж};$$

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^4}{9,1 \cdot 10^{-31}}} \text{ м/с} = 5,9 \cdot 10^7 \text{ м/с}.$$

Задача 2. Между двумя разноименно заряженными пластинами влетает электрон со скоростью $v = 5 \cdot 10^7$ м/с, направленной параллельно этим пластинам. На какое расстояние s сместится электрон за время движения между пластинами? Расстояние между пластинами $d = 0,02$ м, длина пластины $l = 0,05$ м и разность потенциалов между пластинами $\Phi_1 - \Phi_2 = 400$ В. Отношение заряда электрона к его массе $e/m = 1,76 \cdot 10^{11}$ Кл/кг.

Решение. На электрон в однородном электрическом поле действует вдоль оси ординат постоянная сила $F_y = eE$, следовательно, смещение электрона от первоначального направления (рис. 4.28) равно: $s = \frac{a_y t^2}{2}$.

Ускорение электрона равно:

$$a_y = \frac{F_y}{m} = \frac{eE}{m} = \frac{e(\Phi_1 - \Phi_2)}{md}.$$

Вдоль оси абсцисс на электрон сила не действует. Время движения между пластинами $t = l/v$.

Окончательно для смещения имеем:

$$s = \frac{e(\Phi_1 - \Phi_2) l^2}{2mdv^2}.$$

Подставляя значения величин, получим:

$$s = \frac{1,76 \cdot 10^{11} \cdot 4 \cdot 10^2 \cdot 25 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 2 \cdot 10^{-2} \cdot 25 \cdot 10^{14}} \text{ м} = 1,76 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 1,76 \text{ мм}.$$

Задача 3. Два шара одинакового радиуса R с одноименными зарядами q_1 и q_2 находятся на расстоянии $r \gg R$ друг от друга. Если их соединить на короткое время проводником, то заряды станут равными: $q'_1 = q'_2 = \frac{q_1 + q_2}{2}$. Сравните энергию электростатического взаимодействия шаров до и после опыта. Объясните полученный результат.

Решение. Потенциальная энергия взаимодействия заряженных шаров до соединения равна [см. формулу (42.7)]:

$$W_{p1} = q_1 \Phi_2 = q_2 \Phi_1 = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r}.$$

После соединения потенциальная энергия становится равной:

$$W_{p2} = q'_1 \Phi'_2 = q'_2 \Phi'_1 = \frac{q_1 + q_2}{2} \cdot \frac{q_1 + q_2}{2 \cdot 4\pi\epsilon_0 r} = \frac{(q_1 + q_2)^2}{16\pi\epsilon_0 r}.$$

Для сравнения величин W_{p_1} и W_{p_2} найдем их разность:

$$\Delta W = W_{p_2} - W_{p_1} = \frac{(q_1 + q_2)^2}{16\pi\epsilon_0 r} - \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r} = \frac{q_1^2 + 2q_1 q_2 + q_2^2 - 4q_1 q_2}{16\pi\epsilon_0 r} = \frac{(q_1 - q_2)^2}{16\pi\epsilon_0 r} > 0.$$

Следовательно, при любых значениях зарядов q_1 и q_2 энергия электростатического взаимодействия заряженных шаров после перераспределения зарядов возрастает! Этот результат будет еще более парадоксальным, если учесть, что при перераспределении зарядов должно выделиться некоторое количество теплоты в проводнике, через который протекал электрический ток.

Объяснение полученного результата возможно лишь при учете «собственной энергии» заряженных шаров, т.е. потенциальной энергии взаимодействия зарядов на каждом из них. Потенциальную энергию заряда q на шаре радиусом R можно найти следующим образом. Если шар имеет заряд q_1 , то при добавлении малого заряда Δq потенциальная энергия заряда на шаре увеличивается на

$$\Delta W = \varphi_1 \Delta q = \frac{q_1 \Delta q}{4\pi\epsilon_0 R}.$$

При переносе на первоначально незаряженный шар n малых порций заряда по $\Delta q = \frac{q}{n}$ заряд шара линейно увеличивается от 0 до q , среднее значение заряда равно $\frac{q}{2}$.

Тогда потенциальная энергия заряда q на шаре радиусом R равна:

$$W_c = n \Delta W = \frac{n q_{cp} \Delta q}{4\pi\epsilon_0 R} = \frac{q^2}{8\pi\epsilon_0 R}.$$

Следовательно, «собственная энергия» на обоих шарах до перераспределения зарядов равна:

$$W_{c1} = \frac{q_1^2}{8\pi\epsilon_0 R} + \frac{q_2^2}{8\pi\epsilon_0 R} = \frac{q_1^2 + q_2^2}{8\pi\epsilon_0 R}.$$

После перераспределения зарядов эта энергия становится равной:

$$W_{c2} = \frac{2}{8\pi\epsilon_0 R} \left(\frac{q_1 + q_2}{2} \right)^2 = \frac{(q_1 + q_2)^2}{16\pi\epsilon_0 R}.$$

Изменение «собственной энергии»:

$$\Delta W_c = W_{c1} - W_{c2} = \frac{(q_1 + q_2)^2}{16\pi\epsilon_0 R} - \frac{q_1^2 + q_2^2}{8\pi\epsilon_0 R} = \frac{q_1^2 + q_2^2 + 2q_1 q_2 - 2q_1^2 - 2q_2^2}{16\pi\epsilon_0 R} = -\frac{(q_1 - q_2)^2}{16\pi\epsilon_0 R} < 0.$$

Итак, потенциальная энергия взаимодействия зарядов на шарах (их «собственная энергия») уменьшилась. Так как $R \ll r$, то возрастание энергии электростатического взаимодействия шаров всегда меньше, чем уменьшение собственной потенциальной энергии заряженных шаров.

■ Задачи для самостоятельного решения

43.1. Положительный электрический заряд 2 Кл перемещается в электростатическом поле из точки с потенциалом 20 В в точку с потенциалом 5 В. Какую работу совершают при этом силы электрического поля?

43.2. При перемещении в электростатическом поле заряда 4 Кл электрические силы совершили работу 8 Дж. Найдите разность потенциалов начальной и конечной точек пути.

43.3. На параллельных металлических пластинах находятся электрические заряды q и $3q$. Определите разность потенциалов между пластинами площадью S , если расстояние между ними d . Между пластинами находится воздух. Принять $S \gg d^2$.

43.4. В пространство между параллельными незаряженными пластинами 1 и 2 вносится параллельно им пластина 3 с плотностью электрического заряда σ . Определите разность потенциалов между пластинами 1 и 2, если расстояние между ними равно d .

43.5. На металлическом шаре радиусом r имеется электрический заряд q . Каким станет потенциал шара, если внести его внутрь металлической сферы радиусом R , изолированной от Земли, и коснуться им внутренней поверхности сферы?

43.6. Разность потенциалов между двумя заряженными параллельными пластинами равна 100 В, расстояние между пластинами 2 см. Определите напряженность электрического поля между пластинами.

43.7. Напряженность однородного электрического поля 30 В/м. Какова разность потенциалов между точками электрического поля, расположенными на одной линии напряженности на расстоянии 30 см друг от друга?

43.8*. Ускоряющая разность потенциалов в электронно-лучевой трубке $\Delta\varphi = 1,5$ кВ, расстояние от отклоняющих пластин до экрана $L = 30$ см. На какое расстояние сместится пятно на экране осциллографа при подаче на отклоняющие пластины разности потенциалов $U = 20$ В? Расстояние между пластинами $d = 0,5$ см, длина пластин $l = 2,5$ см.

§ 44 Проводники и диэлектрики в электрическом поле

Электризация тел без непосредственного контакта. Проводниками называются такие материалы, в которых имеются свободные носители электрических зарядов. Примерами могут служить металлические тела в твердом и в жидком состоянии, жидкие растворы и расплавы электролитов.

Проводимость металлов обнаруживается, если соединить с помощью металлической проволоки заряженный электрометр с незаряженным (рис. 4.29). Опыт показывает, что по

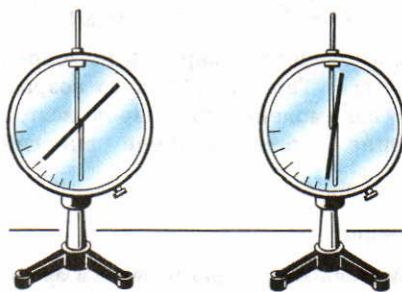


рис. 4.29

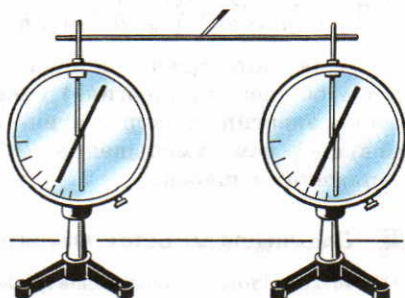


рис. 4.30



рис. 4.31

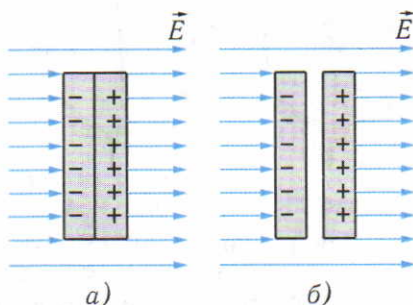


рис. 4.32

металлической проволоке часть зарядов с первого электрометра переходит на второй (рис. 4.30).

Наличие свободных электрических зарядов в проводниках можно обнаружить в следующих опытах. Установим на острие металлическую трубу. Соединив проводником трубу со стержнем электрометра, убедимся в том, что труба не имеет электрического заряда.

Теперь наэлектризуем эбонитовую палочку и поднесем к одному концу трубы. Труба поворачивается на острие, притягиваясь к заряженной палочке (рис. 4.31). Следовательно, на том конце трубы, который расположен ближе к эбонитовой палочке, появился электрический заряд, противоположный по знаку заряду палочки.

По закону сохранения электрического заряда на теле, если нет передачи заряда от других тел, не может появиться электрический заряд одного знака. Если на одной части проводника под действием электрического поля заряженной палочки появился положительный электрический заряд, то на другой его части должен появиться равный по модулю отрицательный электрический заряд. Проверим это на опыте.

Поместим в электрическое поле два соединенных одинаковых металлических диска (рис. 4.32, а) и разведем в электрическом поле их на некоторое расстояние друг от друга (рис. 4.32, б). Затем каждый диск вынесем из поля и соединим поочередно со стержнем электрометра. После прикосновения к электрометру первого диска стрелка электрометра отклоняется, после прикосновения второго диска стрелка возвращается к нулевому делению шкалы. Таким образом, опыт доказывает, что две части металлического тела, разде-

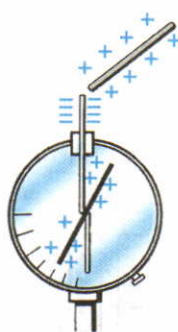


рис. 4.33

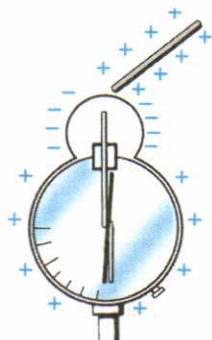


рис. 4.34

новится равной нулю. В том, что внутри проводника, помещенного в электростатическое поле, электрическое поле отсутствует, можно убедиться на опыте.

При поднесении заряженного тела к стержню электрометра его стрелка отклоняется, так как электрическое поле вызывает разделение зарядов в стержне (рис. 4.33).

Накроем стержень электрометра полым металлическим шаром и вновь поднесем заряженное тело. Теперь стрелка электрометра не отклоняется (рис. 4.34). Следовательно, электрическое поле внутри полого металлического шара отсутствует.

Распределение зарядов в проводящих телах. Если наэлектризовать проводящее тело, то силы отталкивания, действующие между одноименными зарядами, выталкивают их на поверхность тела. Покинуть поверхность проводника свободные электрические заряды не могут, так как на них действуют кулоновские силы притяжения зарядов противоположного знака, имеющихсся в проводнике.

Свободные заряды перестают перемещаться вдоль поверхности проводящего тела при достижении такого их распределения, при котором вектор напряженности электрического поля в любой точке перпендикулярен поверхности тела. Поэтому в электрическом поле поверхность проводящего тела любой формы является эквипотенциальной поверхностью. Все точки внутри проводника имеют одинаковый потенциал, равный потенциалу на его поверхности.

Электрическое поле заряженного проводящего шара. Так как поверхность проводника эквипотенциальна, линии напряженности электрического поля заряженного проводящего шара выходят из поверхности шара перпендикулярно ей. Если заряд на поверхности шара равен q , то электрическое поле вне шара такое же, как поле точечного заряда q , находящегося в центре проводящего шара. Внутри проводящего шара напряженность электрического поля равна нулю.

ленного в электрическом поле, действительно приобрели под действием поля электрические заряды, равные по модулю и противоположные по знаку.

Электрическое поле внутри проводящего шара. При внесении проводника в электрическое поле свободные заряды в нем приходят в движение, которое прекращается, когда напряженность поля внутри проводника становится равной нулю.

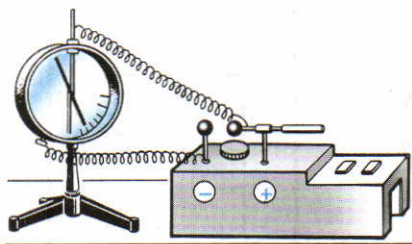


рис. 4.35

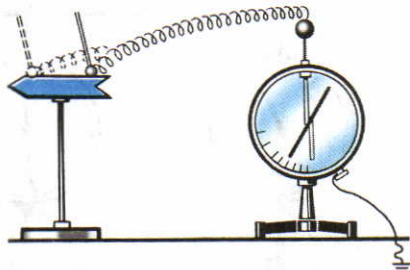


рис. 4.36

Измерение разности потенциалов с помощью электрометра. Так как поверхность любого проводника является эквипотенциальной поверхностью, то при соединении проводником стержня электрометра с одним заряженным телом, а корпуса электрометра с другим телом разность потенциалов между стержнем и корпусом электрометра будет равна разности потенциалов между телами, с которыми они соединены (рис. 4.35). На заряженную стрелку электрометра действует сила, прямо пропорциональная заряду стрелки и напряженности электрического поля, в котором эта стрелка находится. Напряженность электрического поля пропорциональна разности потенциалов между стержнем и корпусом электрометра. Заряд на стрелке также пропорционален разности потенциалов между стрелкой и корпусом. Поэтому сила, действующая на стрелку, пропорциональна квадрату разности потенциалов между стержнем и корпусом электрометра.

Соединяя стержень и корпус электрометра проводниками с различными телами, можно по отклонению стрелки электрометра определить разность потенциалов между телами. Соединив проводником стержень электрометра с заряженным проводящим телом, а корпус электрометра — с Землей, можно измерить разность потенциалов между поверхностью заряженного тела и Землей. Опыт показывает, что при соединении стержня электрометра с различными точками поверхности проводящего тела показания электрометра остаются неизменными (рис. 4.36). Следовательно, поверхность проводящего тела действительно является эквипотенциальной поверхностью.

Поляризация диэлектриков. Диэлектриками, или изоляторами, называются материалы, в которых нет свободных электрических зарядов. К диэлектрикам относятся воздух, стекло, плексиглас, эбонит, слюда, фарфор. Соединив заряженный электрометр с незаряженным с помощью стеклянной трубки, можно убедиться, что электрические заряды от одного электрометра к другому по стеклу не переходят (рис. 4.37).

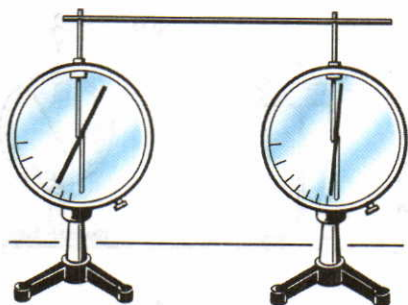


рис. 4.37

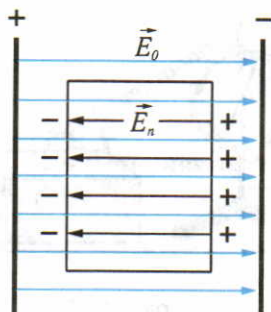


рис. 4.38

Исследуем свойства диэлектриков в электрическом поле. Выполним с пластмассовой трубкой такой же опыт, как с металлической трубкой и заряженной палочкой. Опыт показывает, что незаряженные диэлектрики притягиваются к заряженным телам подобно тому, как это происходит с проводниками. Однако при разделении тела из диэлектрика в электрическом поле на две части каждая из них оказывается нейтральной. Следовательно, в диэлектрике разделение зарядов не происходит, так как в нем нет свободных зарядов. Чем же объяснить притяжение диэлектрика к заряженному телу?

Оказывается, в электрическом поле происходит *поляризация диэлектрика*, т. е. смещение в противоположные стороны разноименных зарядов, входящих в состав атомов и молекул вещества. На поверхности диэлектрика возникают связанные заряды, неспособные свободно перемещаться по диэлектрику в отличие от свободных зарядов в проводниках.

Вектор напряженности $\vec{E}_n$ электрического поля, создаваемого связанными зарядами на поверхности диэлектрика, направлен внутри диэлектрика противоположно вектору напряженности $\vec{E}_0$ внешнего электрического поля, вызывающего поляризацию (рис. 4.38). Напряженность электрического поля внутри бесконечного пространства, полностью заполненного диэлектриком, оказывается равной $\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}_n$, или по модулю $E = E_0 - E_n$. Физическая величина, равная по отношению модуля напряженности $\vec{E}_0$ однородного электрического поля в вакууме к модулю напряженности $\vec{E}$ электрического поля в однородном диэлектрике, заполняющем это поле, называется *диэлектрической проницаемостью вещества*:

$$\varepsilon = E_0 / E. \quad (44.1)$$

Многие диэлектрики состоят из неполярных атомов или молекул. В них внутримолекулярные заряды расположены симметрично, так что центр положительно заряженного яд-

ра совпадает с центром отрицательного электрического заряда электронной оболочки (рис. 4.39, а). В электрическом поле центр электрического заряда электронной оболочки смещается относительно положительно заряженного ядра, так как силы, приложенные к ядру и оболочке, противоположно направлены. В результате смещения центра отрицательного заряда относительно центра положительного заряда атом становится диполем (рис. 4.39, б).

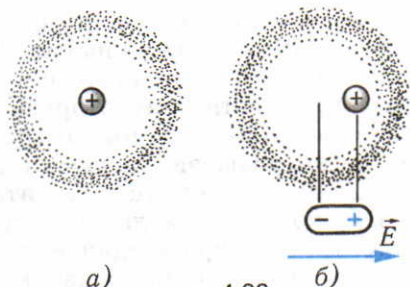


рис. 4.39

Эти диполи в электрическом поле располагаются вдоль линий напряженности, обращая свои отрицательно заряженные концы к той поверхности, в которую входят линии напряженности внешнего поля. На поверхностях образца, перпендикулярных линиям напряженности, остаются нескомпенсированными заряды концов крайних диполей. Они и создают поверхностные (поляризационные) заряды (связанные заряды) и поле, напряженность $\vec{E}_п$ которого уменьшает напряженность внешнего поля внутри диэлектрика. Рассмотренный механизм *электронной поляризации* является универсальным, поскольку смещение электронных оболочек происходит в атомах, молекулах или ионах любого диэлектрика.

Другой разновидностью деформационной поляризуемости является *ионная поляризация*. Кристаллические решетки многих ионных диэлектриков типа NaCl можно рассматривать как состоящие из двух подрешеток, каждая из которых образована ионами одного знака, вставленных одна в другую. В отсутствие электрического поля каждая кристаллическая ячейка и кристалл в целом нейтральны и неполяризованы. Во внешнем электрическом поле ионы подрешеток смещаются друг относительно друга в противоположных направлениях, вследствие чего на противоположных гранях кристалла будут преобладать ионы одного знака, т. е. кристалл в целом поляризуется.

Ионная поляризация в чистом виде не наблюдается, ей всегда сопутствует электронная поляризация.

Многие диэлектрики (H_2O , H_2S , NO_2) образованы из молекул, каждая из которых является электрическим диполем. Такие молекулы и образованные ими диэлектрики называются *полярными*.

При отсутствии внешнего электрического поля молекулярные диполи из-за теплового движения расположены хаотично. Когда полярный диэлектрик попадает в электрическое поле, происходит поворот его молекулярных диполей

в таком направлении, чтобы их оси совпадали с направлением линий напряженности. Но этому препятствует тепловое движение. В результате система полярных молекул в среднем приобретает некоторую преимущественную ориентацию и диэлектрик в целом поляризуется. Такой механизм поляризации называют *ориентационным*.

Если диэлектрик находится в переменном электрическом поле, то он периодически переполяризуется. Повороты полярных молекул и сдвиги ионов в решетке усиливают тепловое движение и приводят к повышению температуры вещества. Потери электрической энергии на нагревание диэлектрика называются диэлектрическими потерями. В реальных диэлектриках имеется дополнительный источник потерь: нагревание их токами проводимости.

При достаточно большой частоте переменного тока полярные молекулы не успевают ориентироваться, а ионы — смещаться. Поэтому у полярных диэлектриков и у диэлектриков с ионной решеткой увеличение частоты вызывает уменьшение поляризуемости и диэлектрической проницаемости. Этого не наблюдается у диэлектриков с чисто электронным механизмом поляризации.

■ Вопросы

1. В чем заключается явление электризации проводников в электрическом поле? 2. Почему напряженность электростатического поля внутри проводника равна нулю? 3. Какой опыт доказывает отсутствие электрического поля внутри проводника? 4. Почему поверхность заряженного проводника является эквипотенциальной поверхностью? 5. Докажите, что внутри проводника все точки имеют одинаковый потенциал, равный потенциалу на поверхности этого проводника. 6. Докажите, что электрическое поле вне заряженного уединенного проводящего шара такое же, как поле точечного заряда в его центре. 7. Почему незаряженные куски диэлектрика притягиваются к заряженным телам? 8. Каковы механизмы поляризации диэлектриков? 9. Что называется диэлектрической проницаемостью?

■ ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1. В пространство между параллельными металлическими пластинами 1 и 2 с разноименными зарядами q и $-q$ вносят незаряженную металлическую пластину 3. Какой заряд q появится на одной из поверхностей пластины 3?

Решение. Движение свободных электронов в пластине 3 будет происходить до тех пор, пока напряженность электрического поля внутри пластины не станет равной нулю. Это значит, что вектор напряженности $\vec{E}'$ однородного поля, создаваемого зарядами $\pm q$, появившимися на поверхности пластины 3, равен по модулю и противоположен по направлению вектору напряженности $\vec{E}$ электрического поля заряженных пластин 1 и 2.

Напряженность электрического поля между пластинами 1 и 2 равна по модулю: $E = E_1 + E_2 = \frac{|q_1|}{2S\epsilon_0} + \frac{|q_2|}{2S\epsilon_0} = \frac{|q_1| + |q_2|}{2S\epsilon_0}$.

Напряженность электрического поля от зарядов на пластине 3 внутри пластины равна: $E' = \frac{|q|}{2S\epsilon_0}$. Так как $E = E'$, то $\frac{|q_1| + |q_2|}{2S\epsilon_0} = \frac{|q|}{\epsilon_0 S}$, откуда $|q| = \frac{|q_1| + |q_2|}{2}$.

Задача 2. Металлический шар радиусом r укреплен на изолирующей подставке и имеет положительный электрический заряд q . Определите потенциал этого шара, если он окружен заземленной сферической оболочкой радиусом R (рис. 4.40).

Решение. Потенциал шара ϕ равен сумме потенциалов ϕ_1 и ϕ_2 электрических полей зарядов на шаре и на оболочке. Так как оболочка заземлена, напряженность электрического поля вне оболочки равна нулю. Это значит, что на оболочке появляется электрический заряд $-q$, равный по модулю заряду на шаре (рис. 4.41). Найдем потенциалы электрических полей, создаваемых зарядами на сфере и на оболочке:

$$\phi_1 = \frac{|q|}{4\pi\epsilon_0 r}; \quad \phi_2 = -\frac{|q|}{4\pi\epsilon_0 R}.$$

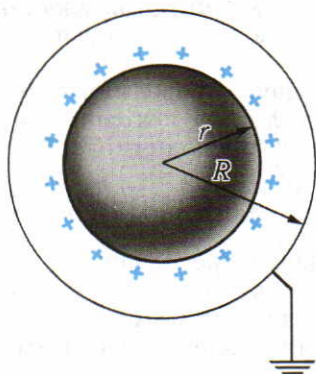


рис. 4.40

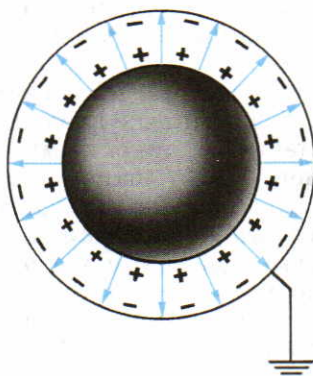


рис. 4.41

Тогда потенциал ϕ шара равен:

$$\phi = \phi_1 + \phi_2 = \frac{|q|}{4\pi\epsilon_0 r} - \frac{|q|}{4\pi\epsilon_0 R} = \frac{|q|}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{R-r}{Rr} \right).$$

Задача 3. На каком расстоянии от маленького заряженного шара напряженность электрического поля в воде с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 81$ будет такой же, как в вакууме на расстоянии $r_1 = 18$ см от центра шара?

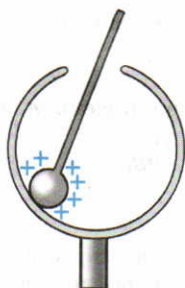


рис. 4.42

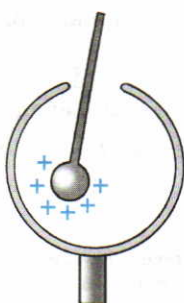


рис. 4.43

сунках 4.42 и 4.43. Будет ли существовать электрическое поле внутри сферы и вне ее?

44.2. Напряженность электрического поля на расстоянии 1 см от поверхности заряженного проводящего шара радиусом 3 см равна 1000 В/м. Определите заряд шара и напряженность электрического поля на расстоянии 2 см от центра шара.

Решение. Так как напряженность поля одинакова ($E_1 = E_2$), то $\frac{|q|}{4\pi\epsilon_0 r_1^2} = \frac{|q|}{4\pi\epsilon_0 r_2^2}$. Отсюда следует: $r_2 = r_1 \sqrt{\frac{1}{\epsilon}} = 0,18 \sqrt{1/81} \text{ м} = 0,02 \text{ м} = 2 \text{ см}$.

■ Задачи для самостоятельного решения

44.1. Внутри незаряженной металлической сферы на изолирующей подставке вносится заряженный металлический шарик так, как показано на рис.

§ 45 Электрическая емкость

Емкость конденсатора. Для накопления значительных разноименных электрических зарядов применяются *конденсаторы*.

Конденсатор — это система из двух проводников (обкладок), разделенных диэлектриком, толщина которого мала по сравнению с линейными размерами проводников. Так, например, две плоские металлические пластины, расположенные параллельно и разделенные слоем диэлектрика, образуют *плоский конденсатор*.

Если пластинам плоского конденсатора сообщить равные по модулю заряды противоположного знака, то напряженность электрического поля между пластинами будет в два раза больше, чем напряженность поля у одной пластины:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon\epsilon_0}, \quad (45.1)$$

где ϵ — диэлектрическая проницаемость диэлектрика, заполняющего пространство между пластинами [см. формулу (41.8)].

Физическая величина, определяемая отношением заряда q одной из пластин конденсатора к разности потенциалов $\Delta\phi$ между обкладками конденсатора, называется *электроемкостью конденсатора*:

$$C = \frac{q}{(\phi_1 - \phi_2)}. \quad (45.2)$$

Единица электроемкости. Единица электроемкости СИ — фарад (сокращенно: Ф). Емкостью в 1 Ф обладает такой конденсатор, разность потенциалов между обкладками которого равна 1 В при сообщении обкладкам разноименных зарядов по 1 Кл:

$$1 \text{ Ф} = 1 \text{ Кл} / 1 \text{ В}.$$

Емкость плоского конденсатора. Формулу для вычисления электроемкости плоского конденсатора можно получить, используя выражение (45.1). В самом деле, напряженность поля

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon \epsilon_0} = \frac{q}{\epsilon \epsilon_0 S},$$

где S — площадь пластины. Поскольку поле однородное, то разность потенциалов между обкладками конденсатора равна:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = Ed = \frac{qd}{\epsilon \epsilon_0 S},$$

где d — расстояние между обкладками. Подставив в формулу (45.2) это уравнение, получим выражение для электроемкости плоского конденсатора:

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}. \quad (45.3)$$

Устройство и типы конденсаторов. Выражение (45.3) показывает, что электроемкость конденсатора можно увеличить путем увеличения площади S его обкладок, уменьшения расстояния d между ними и применения диэлектриков с большими значениями диэлектрической проницаемости ϵ .

В целях экономии материалов металлические электроды конденсаторов обычно изготавливаются в виде тонкой фольги. В качестве изолирующей прокладки используются парафинированная бумага, полистирол, слюда, керамика, воздух. По типу используемого диэлектрика конденсаторы называются бумажными, слюдяными, полистирольными, керамическими, воздушными.

Бумажный конденсатор изготавливают из двух полос металлической фольги, изолированных друг от друга полосами парафинированной бумаги. Полосы фольги и бумагу сворачивают в рулон и помещают в металлический или фарфоровый корпус. Через специальные изоляторы от листов фольги делают два вывода для подключения конденсатора в электрическую цепь (рис. 4.44).

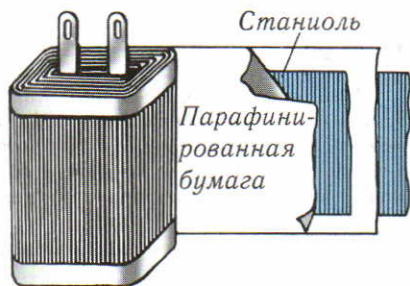


рис. 4.44

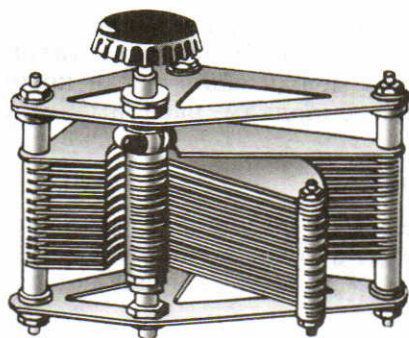


рис. 4.45

Аналогичное устройство имеют и конденсаторы других типов.

Все перечисленные типы конденсаторов можно включать в электрическую цепь, не обращая внимания на полярность.

Но есть электролитические конденсаторы, которые необходимо включать в цепь с учетом полярности. Слой изолятора в электролитическом конденсаторе служит тон-

кая пленка оксида алюминия на алюминиевой фольге, помещенной в электролит. Малая толщина пленки алюминия позволяет изготавливать электролитические конденсаторы большой электроемкости при малых размерах обкладок.

Необходимость соблюдения полярности включения электролитических конденсаторов объясняется тем, что пленка оксида алюминия является хорошим изолятором лишь при одном направлении вектора напряженности электрического поля между обкладками конденсатора. Изменение направления вектора напряженности приводит к значительному уменьшению электрического сопротивления изолирующего слоя. Электрический ток, протекающий через конденсатор, вызывает его разогревание. При достаточно большой разности потенциалов происходит разрушение слоя изолятора, наступает пробой конденсатора. Поэтому электролитические конденсаторы нельзя включать в цепь переменного тока.

Наряду с конденсаторами постоянной электроемкости в практике применяются конденсаторы переменной электроемкости. В этих конденсаторах электроемкость регулируется изменением взаимного положения пластин. При увеличении площади пластин, находящихся друг против друга, электроемкость увеличивается, при уменьшении — уменьшается (рис. 4.45).

■ Вопросы

1. Для чего предназначены конденсаторы?
2. Как устроен конденсатор?
3. Что называется электроемкостью конденсатора?
4. В каких единицах выражается электроемкость?
5. От чего зависит электроемкость конденсатора?
6. Для чего пространство между обкладками конденсатора заполняется диэлектриком?
7. Чем отличаются электролитические конденсаторы от конденсаторов других типов? Почему при их включении надо учитывать полярность?
8. Как устроен конденсатор переменной электроемкости?

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1. Чему равна сила притяжения между пластинами плоского воздушного конденсатора, площадь каждой из которых S , а напряженность электрического поля между ними E ?

Решение. Каждая из пластин конденсатора создает электрическое поле, напряженность которого $\vec{E}_1$ равна по модулю:

$$E_1 = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0} = \frac{q}{2\varepsilon_0 S},$$

где q — модуль заряда на каждой обкладке конденсатора.

Пластины притягиваются с силой $\vec{F}_0$, равной по модулю:

$$F_0 = E_1 q = \frac{q^2}{2\varepsilon_0 S}.$$

Напряженность электрического поля конденсатора равна: $E = \frac{q}{\varepsilon_0 S}$, откуда $q = E\varepsilon_0 S$.

Исключая значение q в выражении для модуля силы $\vec{F}_0$, получим

$$F_0 = \frac{E^2 \varepsilon_0^2 S^2}{2\varepsilon_0 S} = \frac{\varepsilon_0 S E^2}{2} = \frac{\varepsilon_0 S \Delta\varphi^2}{2d^2}.$$

Задача 2. Как изменится сила притяжения между пластинами конденсатора, если пространство между пластинами заполнить жидким диэлектриком с диэлектрической проницаемостью ε ?

Решение. Возможны два случая.

1. Если конденсатор после зарядки отключен от источника тока, то величиной, не изменяющейся при заполнении диэлектриком пространства между обкладками, будет электрический заряд на его пластинах, а напряженность поля окажется меньше в ε раз:

$E_1 = \frac{q}{2\varepsilon\varepsilon_0 S}$. Следовательно, сила взаимодействия между пластинами равна: $F = E_1 q = \frac{q^2}{2\varepsilon_0 \varepsilon S} = \frac{F_0}{\varepsilon}$, т. е. при заполнении пространства диэлектриком она уменьшается в ε раз.

2. Если конденсатор подключен к источнику тока, то разность потенциалов между его обкладками при заполнении диэлектриком не изменяется.

Подставив в формулу $F = \frac{q^2}{2\varepsilon\varepsilon_0 S}$ значение $q = C\Delta\varphi = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S \Delta\varphi}{d}$, получим

$$F = \frac{\varepsilon^2 \varepsilon_0^2 S^2 \Delta\varphi^2}{d^2 2\varepsilon\varepsilon_0 S} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S \Delta\varphi^2}{2d^2} = \varepsilon F_0.$$

Из этого выражения следует, что сила взаимодействия между обкладками конденсатора при заполнении конденсатора диэлектриком возрастает в ε раз.

Задача 3. Определите емкость двух конденсаторов C_1 и C_2 , соединенных параллельно и последовательно.

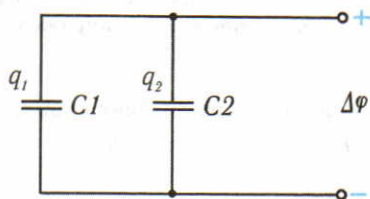


рис. 4.46

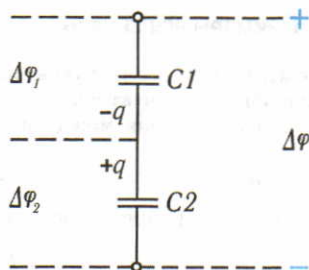


рис. 4.47

Решение. При параллельном соединении конденсаторов (рис. 4.46) разность потенциалов одинакова для обоих конденсаторов: $\Delta\varphi = \text{const}$, а заряд батареи конденсаторов равен $q = q_1 + q_2$.

Емкость двух параллельно соединенных конденсаторов равна:

$$C = \frac{q}{\Delta\varphi} = \frac{q_1 + q_2}{\Delta\varphi}.$$

Учитывая, что $q_1 = C_1\Delta\varphi$, $q_2 = C_2\Delta\varphi$, получаем

$$C = C_1 + C_2.$$

При последовательном соединении конденсаторов (рис. 4.47) их заряды одинаковы, так как на соединенных пластинах суммарный заряд равен нулю.

Разность потенциалов на батарее конденсаторов равна сумме разностей потенциалов на каждом конденсаторе: $\Delta\varphi = \Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2$.

$$\text{Но } \Delta\varphi = \frac{q}{C}, \Delta\varphi_1 = \frac{q}{C_1}, \Delta\varphi_2 = \frac{q}{C_2}.$$

$$\text{Поэтому получим } \frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}.$$

Задачи для самостоятельного решения

45.1. При разности потенциалов между пластинами конденсатора 100 В модуль заряда на пластинах равен $2 \cdot 10^{-4}$ Кл. Чему равна емкость конденсатора?

45.2. Площадь пластины плоского конденсатора 1 м^2 , его емкость равна 1 мкФ. Между пластинами находится слой диэлектрика толщиной 0,1 мм. Какова диэлектрическая проницаемость диэлектрика?

45.3. На обкладках плоского воздушного конденсатора находятся разноименные электрические заряды, по модулю равные 10^{-8} Кл. Чему равна разность потенциалов между обкладками, если площадь пластин 100 см^2 , а расстояние между пластинами равно 0,9 мм?

45.4. Воздушный конденсатор подключен к источнику постоянного тока. Как изменится заряд на обкладках конденсатора и разность потенциалов между ними при заполнении пространства между его пластинами диэлектриком с диэлектрической проницаемостью ϵ ?

45.5. Воздушный конденсатор емкостью 500 пФ заряжен до разности потенциалов 200 В и отключен от источника тока. Какими станут элект-

рический заряд на пластине конденсатора и разность потенциалов между его пластинами при погружении в дистиллированную воду с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 81$?

§ 46 Энергия электрического поля

Энергия заряженного конденсатора. Зарядим конденсатор и затем подключим к его выводам электрическую лампу (рис. 4.48). При подключении лампы наблюдается кратковременная вспышка света. За счет какой энергии произошло нагревание спирали лампы, излучение света?

Суммарный электрический заряд на пластинах конденсатора перед началом опыта был равен нулю, он остался равным нулю и в конце опыта, когда исчезло электрическое поле между его обкладками. Единственное изменение, которое произошло при разряде конденсатора, — это исчезновение электрического поля между его обкладками. Следовательно, электрическое поле обладает энергией, за счет которой и произошла вспышка.

Если на обкладках конденсатора электроемкостью C находятся одинаковые по модулю электрические заряды, то разность потенциалов между обкладками конденсатора равна $\Delta\varphi_0 = q_0/C$.

В процессе разрядки конденсатора разность потенциалов между его обкладками убывает прямо пропорционально заряду q от первоначального значения $\Delta\varphi_0$ до нуля. Среднее значение разности потенциалов в процессе разрядки равно:

$$\Delta\varphi_{\text{ср}} = \frac{\Delta\varphi_0}{2} = \frac{q_0}{2C}.$$

Для работы A , совершаемой электрическим полем при разрядке конденсатора, будем иметь

$$A = q_0 \Delta\varphi_{\text{ср}} = q_0 \Delta\varphi_0 / 2 = \frac{C \Delta\varphi_0^2}{2}. \quad (46.1)$$

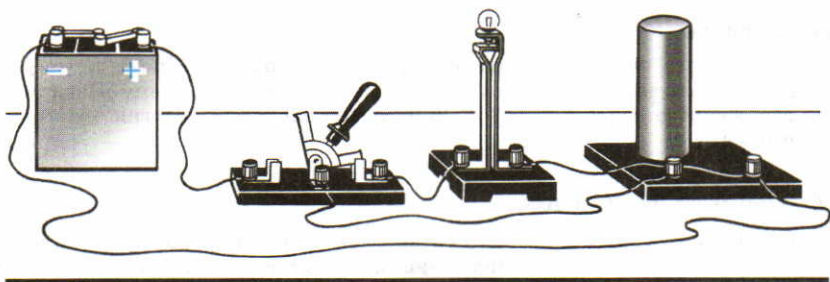


рис. 4.48

Изменение энергии электрического поля равно работе, которая совершена при разрядке конденсатора:

$$\Delta W_э = W_0 - 0 = A = C\Delta\varphi_0^2/2 = q_0^2/(2C) = q_0\Delta\varphi_0/2.$$

Следовательно, энергия $W_э$ электрического поля конденсатора электроемкостью C , заряженного до разности потенциалов $\Delta\varphi$, равна:

$$W_э = q^2/2C = q\Delta\varphi/2 = C\Delta\varphi^2/2. \quad (46.2)$$

Подставив в формулу (46.2) выражение электроемкости плоского конденсатора [см. формулу (45.3)] и выразив разность потенциалов через напряженность поля, получим:

$$W_э = \frac{C\Delta\varphi^2}{2} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{2d} E^2 d^2 = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2} Sd.$$

Разделив обе части уравнения на объем $V = Sd$, занятый электрическим полем внутри конденсатора, получим

$$w_э = \frac{W_э}{V} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2}. \quad (46.3)$$

Величина $w_э = W_э/V$ имеет смысл плотности энергии электрического поля, т. е. энергии, содержащейся в единице объема. Итак, плотность энергии электрического поля пропорциональна квадрату напряженности. Этот вывод справедлив для электрических полей любой конфигурации, а не только для однородного поля.

Впервые понятие плотности энергии электрического поля ввел Дж. Максвелл. В отличие от сторонников теории дальнего действия, считавших, что энергия концентрируется на заряженных телах, Максвелл исходил из полевых представлений. Он полагал, что энергия электрического поля рассредоточена по всему объему с плотностью, выражающейся формулой (46.3).

■ Вопросы

1. Опишите опыт, доказывающий, что электрическое поле между обкладками заряженного конденсатора обладает энергией. 2. Чему равна энергия заряженного конденсатора? 3. Чему равна плотность энергии электрического поля?

■ ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Задача. Заряженный конденсатор емкостью C и зарядом q подключили параллельно к другому незаряженному конденсатору такой же емкости. Сравните энергию электрического поля системы конденсаторов до и после подключения. Объясните полученный результат.

Решение. Начальная энергия системы конденсаторов равна:

$$W_1 = \frac{q^2}{2C} + 0 = \frac{q^2}{2C}.$$

После параллельного подключения второго конденсатора произойдет перераспределение зарядов между ними. В соответствии с законом сохранения заряда при одинаковой электроемкости конденсаторов и одинаковой разности потенциалов на их обкладках будут одинаковыми и заряды на них:

$$q_1 = q_2 = q/2.$$

После соединения конденсаторов их энергия будет равна:

$$W_2 = \frac{q_1^2}{2C} + \frac{q_2^2}{2C} = \frac{(q/2)^2}{2C} + \frac{(q/2)^2}{2C} = \frac{q^2}{4C}.$$

Мы видим, что половина энергии электрического поля как бы исчезла: $W_2 = W_1/2$. Уменьшение энергии конденсатора связано с тем, что часть энергии электрического поля пошла на нагрев проводов и излучение электромагнитных волн. Причем результат не зависит от электрического сопротивления проводов.

■ Задачи для самостоятельного решения

46.1. Вычислите энергию электрического поля конденсатора электроемкостью 10 мкФ, заряженного до разности потенциалов 10 В.

46.2. Воздушный конденсатор электроемкостью 250 пФ подключен к источнику постоянной разности потенциалов 100 В. Вычислите энергию конденсатора. Как изменится энергия конденсатора при заполнении пространства между пластинами веществом с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 20$?

§ 47 Применение диэлектриков

Спонтанная поляризация. Если в ионном кристалле центры положительного и отрицательного зарядов ионов, расположенных в одной элементарной ячейке, не совпадают, то каждая элементарная ячейка такого кристалла может рассматриваться как диполь, т. е. система из двух точечных разноименных зарядов, равных по модулю. До тех пор пока энергия взаимодействия между такими диполями превышает среднюю энергию теплового движения частиц, отдельные микроскопические области кристалла могут быть самопроизвольно, или, как принято говорить, спонтанно, поляризованными. В каждой из таких областей, называемых доменами, диполи элементарных ячеек ориентированы одинаково, а сами домены ориентированы хаотично (рис. 4.49). На поверхности кристалла чередуются положительно и отрицательно заряженные участки, и кристалл в целом не создает в окружающем пространстве электрического поля.

Сегнетоэлектрики. Кристаллы, обладающие в некотором температурном интервале спонтанной поляризацией, называ-

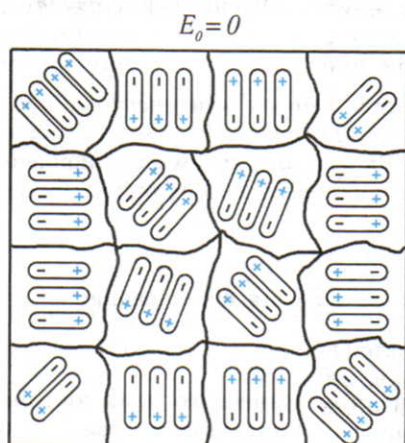


рис. 4.49

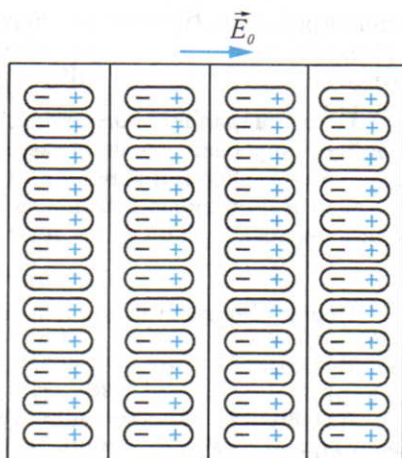


рис. 4.50

ют сегнетоэлектриками. Основные свойства сегнетоэлектриков впервые были изучены в 30-х гг. И. В. Курчатовым и П. П. Кобеко на кристаллах сегнетовой соли. Впоследствии было открыто и исследовано около 80 сегнетоэлектриков. Наиболее интересным для практических применений является титанат бария BaTiO_3 , открытый в 1944 г. Б. М. Вулом.

Внесение сегнетоэлектрика в электрическое поле приводит к тому, что в части его доменов все диполи ориентируются вдоль линии напряженности (рис. 4.50).

Вследствие того что в сегнетоэлектриках происходит ориентация целых макроскопических областей — доменов, а не отдельных молекулярных диполей, сегнетоэлектрики обладают большой диэлектрической проницаемостью. Сегнетоэлектрические материалы, обладающие высокими значениями диэлектрической проницаемости (порядка $10^3 - 10^4$), применяют для изготовления малогабаритных конденсаторов.

Точка Кюри. Для сегнетоэлектриков характерно наличие предельной температуры — точки Кюри, выше которой спонтанная поляризация исчезает и сегнетоэлектрик становится обычным диэлектриком.

Точка Кюри для титаната бария близка к температуре 120°C . Переход через точку Кюри сопровождается резким изменением диэлектрической проницаемости. Это обусловлено тем, что при температуре Кюри происходит перестройка кристаллической структуры.

Пьезоэлектрический эффект. Если подвергнуть образец сегнетоэлектрика одностороннему сжатию вдоль направления остаточной поляризации, то размеры образца и каждой эле-

ментарной ячейки в этом направлении уменьшатся. При этом уменьшатся расстояния между центрами положительного и отрицательного зарядов в каждой ячейке и остаточная поляризация в целом. В результате изменится разность потенциалов между гранями образца, перпендикулярными направлению силы. При растяжении образца остаточная поляризация и соответствующая ей поверхностная плотность зарядов на гранях увеличивается, что приводит к возникновению разности потенциалов противоположного знака.

Явление возникновения поляризационных зарядов при деформации кристалла называют *прямым пьезоэлектрическим эффектом*. Он был открыт в 1880 г. братьями Пьером и Жаком Кюри на сегнетозлектрическом материале — кварце. Все сегнетозлектрики являются пьезоэлектриками, но далеко не все пьезоэлектрики обладают сегнетозлектрическими свойствами.

Существует и *обратный пьезоэффект* — деформация пьезоэлектрика, помещенного в электрическое поле. Обратный пьезоэффект объясняется тем, что под действием электрического поля элементарные ячейки удлиняются или укорачиваются, а это приводит к макроскопической деформации образца. Деформация пропорциональна приложенной разности потенциалов. Прямой и обратный пьезоэффект широко применяют в практике для преобразования механических колебаний в электрические и наоборот. Пьезоэлектрический элемент находится в пьезоэлектрических микрофонах и телефонах, в эхолотах, гидролокаторах, в тензометрах (измерителях давлений и механических напряжений) и т. п.

■ Вопросы

1. Что такое сегнетозлектрики и где их применяют? 2. Что такое точка Кюри? 3. В чем заключается пьезоэлектрический эффект (прямой и обратный)? 4. Какое применение находит пьезоэлектрический эффект?



ГЛАВА 5

ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

§ 48

Условия существования постоянного тока

В предыдущей главе рассматривались электрические явления, в которых электрические заряды находились в покое. Но наибольший практический интерес представляют явления, связанные с упорядоченным движением электрических зарядов.

Упорядоченное движение электрически заряженных частиц называется *электрическим током*. Электрический ток называется *постоянным*, если сила тока и его направление не изменяются с течением времени. За направление тока условно выбрано направление движения положительных зарядов.

Постоянный электрический ток может возникать в результате процессов различной физической природы. Например, испускаемые радиоактивными веществами отрицательно заряженные электроны и положительно заряженные α -частицы могут в вакууме пролетать беспрепятственно значительные расстояния. Такой поток электронов или α -частиц представляет собой постоянный электрический ток.

В данной главе нас будет интересовать постоянный ток в проводниках, создаваемый благодаря особым устройствам — источникам тока.

Напомним, что проводники — это такие тела, в которых имеются свободные частицы, обладающие электрическим зарядом и способные ускоряться и, следовательно, перемещаться под действием приложенных к ним электрических сил.

Если бы заряженные частицы, приведенные в движение в замкнутом проводнике, не взаимодействовали с другими частицами, то они двигались бы бесконечно долго.

Такой ток можно наблюдать в некоторых веществах при весьма низких температурах; удельное сопротивление таких веществ — их называют сверхпроводниками — равно нулю при этих температурах.

Но в большинстве проводников при протекании тока движущиеся заряженные частицы взаимодействуют с неподвижными частицами и теряют свою кинетическую энергию.

Поэтому для поддержания постоянного тока в цепи необходимо пополнять энергию заряженных частиц, т. е. совершать работу за счет действия каких-то источников.

Возьмем два заряженных проводящих тела, заряды которых равны по модулю, но противоположны по знаку. Соединим эти тела проводником (рис. 5.1). По проводнику пойдет ток.

Перемещение зарядов будет происходить до тех пор, пока не исчезнет электрическое поле в проводнике в результате выравнивания потенциалов на телах А и В. После этого ток в проводнике прекратится.

Для того чтобы ток был постоянным, необходимо, чтобы на концах проводника поддерживалась постоянная разность потен-

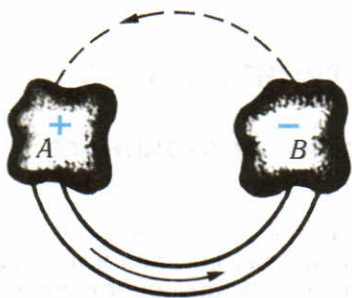


рис. 5.1

циалов, иными словами, чтобы в проводнике существовало неизменяющееся электрическое поле. Очевидно, заряженные тела не годятся для создания постоянного тока в цепи. Для этой цели необходимо особое устройство — *источник тока* (генератор).

Что такое источник тока? Для того чтобы ток не прекращался, необходимо, чтобы положительные заряды, перемещающиеся на тело B с тела A , вновь возвращались бы на тело A , а отрицательные заряды возвращались на тело B , т. е. чтобы на некотором участке замкнутой цепи заряды двигались против действующих на них электростатических сил, как это показано пунктиром на рисунке 5.1. Для этого на заряды, кроме электростатических сил, должны действовать другие силы, направленные противоположно электростатическим силам. Такие силы неэлектростатического происхождения называют *сторонними силами*. Источник тока представляет собой устройство, в котором на электрические заряды действуют сторонние силы.

Сторонние силы в различных источниках возникают по разным причинам. В химических источниках, например в автомобильном аккумуляторе или в гальваническом элементе, они возникают благодаря химическим реакциям на границе соприкосновения пластин аккумулятора или электродов батарейки с жидким электролитом. В фотоэлементе они возникают в результате действия света на электроны в металле или полупроводнике. В генераторах электростанций сторонние силы возникают при движении проводников в магнитном поле.

Электрическая цепь постоянного тока. Рассмотрим простейшую электрическую цепь постоянного тока, составленную из гальванического элемента, электрической лампы и проводников.

При замыкании электрической цепи нить лампы нагревается протекающим через нее электрическим током и излучает свет. Постоянная интенсивность свечения лампы свидетельствует о том, что в цепи протекает постоянный, не изменяющийся во времени электрический ток. Подключив к выводам гальванического элемента прибор для измерения разности потенциалов — вольтметр, мы обнаружим, что на выходе источника тока она также остается неизменной.

На внешнем участке цепи электрические заряды движутся под действием сил электрического поля. Перемещение зарядов внутри проводника не приводит к выравниванию потенциалов всех точек проводника, так как в каждый момент времени за счет действия источника тока к одному концу электрической цепи подходит точно такое же количество электричества, какое из него перешло к другому концу внешней электрической цепи. Поэтому сохраняется неизменной

разность потенциалов между началом и концом внешнего участка электрической цепи, что, в свою очередь, приводит к тому, что напряженность электрического поля внутри проводников в этой цепи остается постоянной во времени.

Зависимость силы тока от напряжения. Немецкий физик Г. Ом в 1826 г. обнаружил, что сила тока I в проводнике прямо пропорциональна разности потенциалов на этом участке:

$$I \sim (\varphi_1 - \varphi_2).$$

Другими словами, отношение разности потенциалов между концами проводника, являющегося участком электрической цепи, к силе тока в цепи есть величина постоянная:

$$(\varphi_1 - \varphi_2)/I = R = \text{const.} \quad (48.1)$$

Эта величина называется *электрическим сопротивлением проводника*.

Единицей электрического сопротивления в СИ является Ом:

$$1 \text{ Ом} = \frac{1 \text{ В}}{1 \text{ А}}.$$

Электрическое сопротивление проводника зависит от вещества, длины l и площади поперечного сечения S :

$$R = \rho \frac{l}{S}. \quad (48.2)$$

Коэффициент ρ в формуле (48.2) называется *удельным сопротивлением вещества*.

Электродвижущая сила источника. В источниках тока сторонние силы перемещают положительные заряды между электродами от отрицательного полюса к положительному, а отрицательные заряды от положительного к отрицательному полюсу. Чем больший заряд перемещается при этом, тем большая работа $A_{\text{ст}}$ совершается. Отношение работы $A_{\text{ст}}$ к переносимому заряду для данного источника остается постоянной величиной. Поэтому указанное отношение может служить характеристикой источника тока.

Отношение работы сторонних сил к значению положительного заряда, переносимого внутри источника от отрицательного полюса к положительному, называют *электродвижущей силой источника* (сокращенно ЭДС). Обозначают ее $\mathcal{E}$. Из определения ЭДС следует:

$$\mathcal{E} = A_{\text{ст}}/q, \quad (48.3)$$

где $A_{\text{ст}}$ — работа, совершаемая в источнике сторонними силами при перемещении положительного заряда q . Из этой формулы видно, что ЭДС, как и разность потенциалов, выражается в вольтах.

Различные источники тока отличаются своей ЭДС. Например, ЭДС гальванических элементов равна 1—2 В, свинцовых аккумуляторов — 2 В; ЭДС индукционных генераторов достигает 15 кВ.

Когда к полюсам источника тока присоединяют проводник, то на внешнем участке цепи электрические заряды движутся под действием электростатических сил $\vec{F}_э$, внутри же источника на них действуют сторонние силы $\vec{F}_{ст}$ и электростатические силы $\vec{F}_э$ (рис. 5.2).

Работа $A_ц$ перемещения заряда по всей замкнутой цепи складывается из работы электростатических сил $A_{1,2}$ на внешнем участке цепи, работы электростатических сил $A_{2,1}$ на внутреннем участке и работы сторонних сил $A_{ст}$:

$$A_ц = A_{1,2} + A_{2,1} + A_{ст}.$$

Первые два слагаемых представляют собой работу электростатических сил по замкнутому участку. Она, как известно, равна нулю. Следовательно,

$$A_ц = A_{ст}. \quad (48.4)$$

Таким образом, работа по перемещению заряда во всей замкнутой цепи совершается за счет сторонних сил. Работа сторонних сил компенсирует потери энергии носителями заряда при их движении по всей цепи.

Рассчитаем работу по переносу единичного положительно заряда.

Из равенства (48.4) получим

$$A_ц/q = A_{ст}/q = \mathcal{E}. \quad (48.5)$$

Итак, ЭДС источника равна отношению работы, совершаемой сторонними силами при перемещении положительного заряда по всей замкнутой цепи, к значению этого заряда.

Механическая аналогия электрической цепи. Для того чтобы яснее представить себе роль источника тока, рассмотрим действие установки, изображенной на рисунке 5.3, а. Здесь шарик, движущийся вдоль винтовой наклонной плоскости, служит моделью свободной заряженной частицы («носителя заряда»), консервативное потенциальное поле силы тяжести служит аналогом консервативного электрического поля, сила трения служит аналогом электрического сопротивления. Соответственно движение свободных электрических зарядов в проводнике под действием электрического

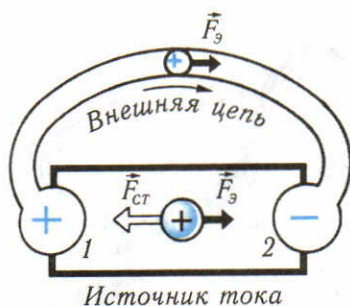


рис. 5.2

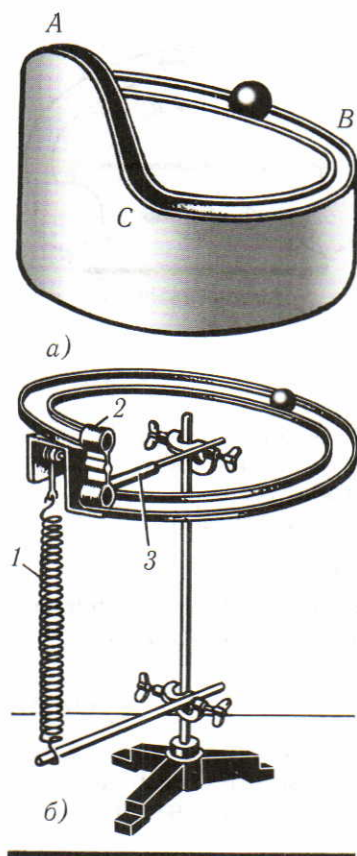


рис. 5.3

защелкой 3. Каждый раз, когда шарик, скатываясь, ударяет по защелке, механизм срабатывает и поднимает шарик вновь к вершине плоскости.

Естественно, что перед началом опыта пружина должна быть деформирована и за счет этого получить запас энергии, которая постепенно будет расходоваться на подъем шарика снизу вверх.

Источник тока, в котором заряды перемещаются по внутренней части цепи против электростатического поля, выполняет ту же функцию, что и подъемный механизм в этой модели.

■ Вопросы

1. Что такое постоянный электрический ток? 2. При каких условиях в замкнутой электрической цепи протекает постоянный электрический ток? 3. Ка-

поля аналогично движению шариков под действием силы тяжести.

Если бы на шарики при их движении не действовала сила трения, то их кинетическая энергия у основания плоскости была бы равна потенциальной энергии у ее вершины. За счет этой кинетической энергии шарики могли бы подняться к вершине А по участку СА и вновь двигаться вниз. Следовательно, при отсутствии трения движение шариков было бы непрерывным.

Однако, двигаясь по наклонной плоскости, шарики из-за трения теряют энергию. Поэтому для их непрерывного движения нужно, чтобы на участке СА на них действовала какая-то сила, направленная противоположно силе тяжести, и совершала работу, поднимая их вновь к вершине А. Эта сила и будет аналогом сторонних сил в электрической цепи.

Эту работу может совершить, например, рука, поднимающая шарики. Но можно использовать небольшой заводной подъемный механизм, действующий при помощи сил упругости пружины 1 (рис. 5.3, б). Поворачивающаяся часть 2 механизма удерживается

ково назначение источника тока? 4. Что такое сторонние силы? 5. Что такое ЭДС? 6. Какой механической моделью можно пояснить процессы в замкнутой электрической цепи постоянного тока?

§ 49 Закон Ома для полной цепи

Закон Ома для полной цепи. На рисунке 5.4 изображена замкнутая цепь постоянного тока. ЭДС источника равна $\mathcal{E}$, его внутреннее сопротивление r , сопротивление внешнего участка цепи (нагрузки) R , сопротивлением проводов пренебрегаем. Ток идет в направлении, указанном стрелкой.

Полная работа $A_{\text{полн}}$ при перемещении заряда q по замкнутой цепи равна сумме работы $A_{\text{ст}}$ сторонних сил и работы $A_{\text{эл}}$ кулоновских сил:

$$A_{\text{полн}} = A_{\text{ст}} + A_{\text{эл}}. \quad (49.1)$$

При перемещении заряда по замкнутому контуру работа кулоновских сил равна нулю $A_{\text{эл}} = 0$, следовательно:

$$A_{\text{полн}} = A_{\text{ст}}. \quad (49.2)$$

Полная работа $A_{\text{полн}}$ равна сумме работы тока на внутреннем и работы тока на внешнем участках цепи:

$$A_{\text{полн}} = I^2 r t + I^2 R t, \quad (49.3)$$

где r и R — электрические сопротивления внутреннего и внешнего участков цепи.

Работа сторонних сил равна:

$$A_{\text{ст}} = q\mathcal{E} = It\mathcal{E}. \quad (49.4)$$

Отсюда следует:

$$I^2 r t + I^2 R t = It\mathcal{E}, \quad (49.5)$$

$$\mathcal{E} = I(r + R), \quad (49.6)$$

$$I = \frac{\mathcal{E}}{r + R}. \quad (49.7)$$

Полученное выражение называется *законом Ома для полной цепи*: сила тока в полной цепи равна электродвижущей силе источника, деленной на сумму сопротивлений внешнего и внутреннего участков цепи.

Из формулы закона Ома следует, что сила тока в цепи зависит от трех величин. Две из них — ЭДС $\mathcal{E}$ и внутреннее сопротивление источника r — относятся к самому источнику, а третья — R — к внешней цепи.

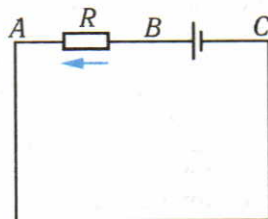


рис. 5.4

Формула закона Ома для всей цепи показывает, как можно приближенно измерить ЭДС источника. Если замкнуть источник на вольтметр, сопротивление которого R_B значительно больше внутреннего сопротивления источника r ($R_B \gg r$), то внутренним сопротивлением можно пренебречь и тогда из формулы (49.7) следует:

$$\mathcal{E} = IR_B. \quad (49.8)$$

Значит, измеряя напряжение на полюсах источника, замкнутого внешней нагрузкой, сопротивление которой $R \gg r$, мы получаем приближенное значение ЭДС источника. Чем больше сопротивление внешней нагрузки по сравнению с внутренним сопротивлением источника, тем более точный результат будет получен. Очевидно, что ЭДС источника тока равняется напряжению между полюсами разомкнутого источника тока (когда сопротивление внешней цепи бесконечно велико).

Принципиально правильно напряжение между полюсами разомкнутого источника можно измерить с помощью электрометра или электростатического вольтметра.

Короткое замыкание. Какие же предельные значения силы тока можно получить в цепи, пользуясь данным источником тока? ЭДС источника $\mathcal{E}$ и его внутреннее сопротивление r являются величинами постоянными. Поэтому сила тока в цепи будет зависеть только от сопротивления внешней цепи R .

Пусть к полюсам источника присоединен проводник, сопротивление которого ничтожно мало по сравнению с внутренним сопротивлением источника. Этот случай в технике получил название *короткого замыкания*.

Из закона Ома следует, что если сопротивление $R=0$, то напряжение между полюсами источника ($U=IR$) уменьшается до нуля, а сила тока короткого замыкания достигает максимального значения:

$$I_{к.з} = \mathcal{E}/r.$$

Как мы видим, сила тока короткого замыкания зависит не только от ЭДС источника, но и от внутреннего сопротивления. У источника со сравнительно большим внутренним сопротивлением, как, например, у гальванических элементов, сила тока короткого замыкания небольшая, а потому этот ток для них не очень опасен.

Иное дело в свинцовых аккумуляторах: внутреннее сопротивление у них мало (0,1—0,01 Ом). Поэтому сила тока короткого замыкания очень велика, порядка 20—200 А. Такой ток может разрушить пластины аккумуляторов. Особенно опасны короткие замыкания в осветительных сетях, питае-

мых от подстанций. При значительной ЭДС (свыше 100 В) внутреннее сопротивление этих источников ничтожно мало. Поэтому сила тока короткого замыкания может достигнуть тысяч ампер. В этом случае короткое замыкание может вызвать перегрев проводов, пожар здания и т. д. Чтобы избежать этого, в такие цепи включают предохранители, в которых тонкий проводник АВ (рис. 5.5) плавится при силе тока, превышающей ее допустимое значение для данной цепи, и размыкает цепь. В настоящее время обычно применяют электромагнитный автоматический выключатель.

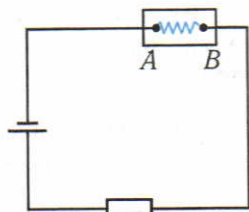


рис. 5.5

■ Вопросы

1. Как формулируется закон Ома для полной цепи? 2. Почему напряжение на полюсах источника тока зависит от электрического сопротивления внешней цепи? 3. При каком условии напряжение, измеренное на полюсах источника тока, можно считать равным ЭДС источника?

■ ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1. Проводник длиной 50 см и площадью поперечного сечения $0,2 \text{ мм}^2$ изготовлен из материала с удельным сопротивлением $1,2 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ и подключен к источнику тока, ЭДС которого 4,5 В и внутреннее сопротивление 3 Ом. Найдите напряжение между концами проводника и напряженность электрического поля в нем.

Решение.

$$U = IR; I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}; R = \rho \frac{l}{S};$$

$$U = \frac{\mathcal{E}R}{R+r} = \frac{\mathcal{E}}{1 + \frac{r}{R}} = \frac{\mathcal{E}}{1 + \frac{rS}{\rho l}};$$

$$U = \frac{4,5}{1 + \frac{3 \cdot 0,2 \cdot 10^{-6}}{1,2 \cdot 10^{-6} \cdot 0,5}} \text{ В} = 2,25 \text{ В};$$

$$E = \frac{U}{l} = \frac{2,25 \text{ В}}{0,5 \text{ м}} = 4,5 \frac{\text{В}}{\text{м}}.$$

Задача 2. Какую ошибку в измерении ЭДС источника тока мы допускаем, если показание школьного лабораторного вольтметра, присоединенного к его полюсам, равно 4 В, принимаем за ЭДС источника тока? Внутреннее сопротивление источника тока $r = 5 \text{ Ом}$, сопротивление вольтметра $R_B = 2000 \text{ Ом}$.

Решение. Вольтметр показывает напряжение между его зажимами. Когда вольтметр присоединен к полюсам источника, показание вольтметра меньше ЭДС источника.

Напряжение на зажимах $U = IR_B$, электродвижущая сила $\mathcal{E} = I(R_B + r)$. Отсюда

$$\mathcal{E} = \frac{U(R_B + r)}{R_B} = 4 \cdot 2005/2000 \text{ В} = 4,01 \text{ В}.$$

Таким образом, абсолютная ошибка в измерении ЭДС составляет: $\Delta \mathcal{E} = \mathcal{E} - U = Ir$, т. е. $\Delta \mathcal{E} = 0,01 \text{ В}$, а относительная ошибка

$$\delta = \frac{\Delta \mathcal{E}}{\mathcal{E}} = \frac{Ir}{I(R_B + r)} = \frac{r}{R_B + r} \approx \frac{r}{R_B} = \frac{0,01}{4} = 0,0025, \text{ или } 0,25\%.$$

Если цена деления вольтметра равна 0,2 В, то ошибка в 0,01 В не может быть обнаружена при измерениях данным вольтметром.

■ Задачи для самостоятельного решения

49.1. ЭДС источника тока равна 4 В, к его полюсам присоединен резистор с номинальным сопротивлением 8 Ом, в результате чего в цепи установилась сила тока 0,4 А. Определите по этим данным внутреннее сопротивление источника.

49.2. Определите показания вольтметра и амперметра в цепи по схеме (рис. 5.6). ЭДС источника равна 6 В, его внутреннее сопротивление 0,2 Ом; сопротивления резисторов R_1 и R_2 соответственно равны 1,8 и 10 Ом. Сопротивление вольтметра считать бесконечно большим, амперметра — бесконечно малым.

49.3. К полюсам источника тока с ЭДС 8 В присоединили проводник сопротивлением 30 Ом. При этом напряжение между концами проводника стало равным 6 В. Чему равно внутреннее сопротивление источника?

49.4. Для определения ЭДС и внутреннего сопротивления источника тока к его выходу подключили реостат. При одном положении движка реостата сила тока в цепи была $I_1 = 1,5 \text{ А}$, а напряжение $U_1 = 4,5 \text{ В}$; при другом положении движка получены значения $I_2 = 2 \text{ А}$, $U_2 = 3 \text{ В}$. Найдите ЭДС источника и его внутреннее сопротивление.

49.5. Опасным для жизни человека является поражение электрическим током при силе тока более 20 мА. Какое напряжение может представлять опасность для жизни человека? Электрическое сопротивление тела человека при поврежденной коже около 1000 Ом.

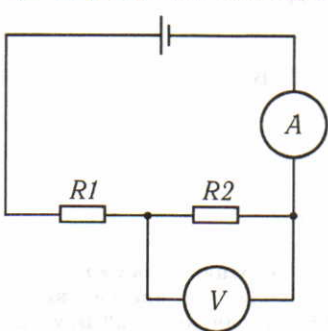


рис. 5.6

49.6. Электрическое сопротивление верхнего рогового слоя кожи человека примерно 100 кОм, электрическое сопротивление тела человека при поврежденной коже около 1 кОм. Электрический пробой кожи человека наступает при напряжении около 200 В. Какие значения имеет сила тока при этом напряжении при неповрежденной коже и после электрического пробоя кожи?

49.7. В школьном кабинете используется высоковольтный выпрямитель с ЭДС до 100 кВ. Каково минимальное значение сопротивления резистора, который должен быть включен внутри прибора для ограни-

чения силы тока в целях безопасности, если опасной для жизни человека является сила тока 20 мА?

49.8. В цепи, изображенной на рисунке 5.7, ползунок реостата переместили так, что лампочка стала светить ярче. Как изменилось при этом показание вольтметра?

49.9. Электрическая цепь состоит из источника тока и резистора. Во сколько раз уменьшится сила тока в ней, если резистор с сопротивлением R заменить резистором с вдвое большим сопротивлением? Внутреннее сопротивление источника тока равно r .

49.10. ЭДС батареи аккумуляторов равна 12 В, а ее внутреннее сопротивление 0,04 Ом. Чему равна сила тока короткого замыкания у этого аккумулятора?

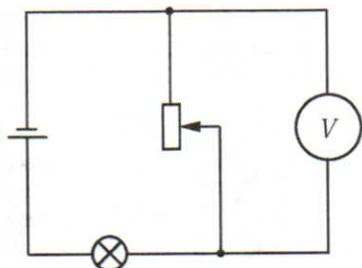


рис. 5.7

§ 50 Последовательное и параллельное соединение проводников в электрической цепи

Электрическая цепь состоит из различных элементов, которые могут быть соединены последовательно или параллельно.

При последовательном соединении проводников (рис. 5.8) сила тока во всех проводниках одинакова — в противном случае заряды накапливались бы в каких-то точках цепи. Следовательно,

$$I = I_1 = I_2. \quad (50.1)$$

Напряжение U на всей цепи равно:

$$U = U_1 + U_2. \quad (50.2)$$

Применяя закон Ома для участка цепи ко всей внешней цепи, сопротивление которой R , и к каждому из последовательно соединенных проводников R_1 и R_2 , получаем

$$U = IR, \quad U_1 = IR_1, \quad U_2 = IR_2. \quad (50.3)$$

Отсюда с учетом соотношения (50.2) следует:

$$IR = IR_1 + IR_2,$$

или

$$R = R_1 + R_2. \quad (50.4)$$

При последовательном соединении полное сопротивление цепи равно сумме

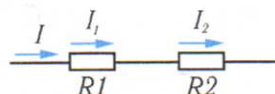


рис. 5.8

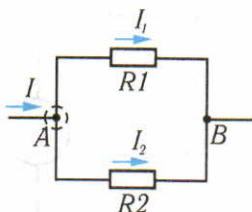


рис. 5.9

сопротивлений всех отдельных проводников:

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n. \quad (50.5)$$

При параллельном соединении проводников (рис. 5.9) напряжения U_1 и U_2 одинаковы, так как резисторы присоединены к одним и тем же точкам цепи (A и B) и равны напряжению на всей цепи:

$$U_1 = U_2 = U. \quad (50.6)$$

Сила тока в неразветвленной цепи равна сумме сил токов в параллельно включенных элементах:

$$I = I_1 + I_2. \quad (50.7)$$

Обозначим полное сопротивление разветвленной цепи через R , а сопротивление каждого проводника на этом участке через R_1 и R_2 .

Из закона Ома для участка цепи следует:

$$I = \frac{U}{R}, \quad I_1 = \frac{U}{R_1}, \quad I_2 = \frac{U}{R_2}. \quad (50.8)$$

Отсюда с учетом соотношения (50.7) получаем

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}. \quad (50.9)$$

Величина, обратная сопротивлению всего разветвленного участка цепи, равна сумме величин, обратных сопротивлениям каждого из параллельно соединенных проводников.

В электрической цепи могут быть участки со смешанным соединением — как с последовательным, так и с параллельным (рис. 5.10). В этой цепи участок AB представляет собой параллельное соединение, а вся цепь — последовательное соединение участков AB и BC.

Шунт к амперметру. Каждый измерительный прибор рассчитывают на определенную максимальную для него силу тока или на предельное для него напряжение. Но всегда оказывается возможным расширить пределы измерения данным прибором. Рассмотрим, как можно увеличить пределы измерения силы тока данным амперметром.

Для этого параллельно амперметру присоединяют проводник, через который проходит часть измеряемого тока. Сопротивление этого проводника, называемого шунтом, рассчитывают так, чтобы сила тока через амперметр не превышала его предельного значе-

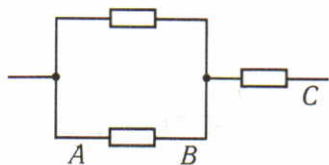


рис. 5.10

ния, а остальная часть тока шла бы через шунт. При этом, разумеется, изменится цена деления шкалы данного прибора.

Поясним это примером. Амперметром, сопротивление которого равно R_a , рассчитанным на максимальную силу тока I_a , требуется измерить силу тока в цепи $I_{\text{ц}}$, которая может достигать значений, в n раз превышающих максимально допустимую силу тока в амперметре ($I_{\text{ц}} = nI_a$). Чему должно быть равно сопротивление $R_{\text{ш}}$ шунта Ш (рис. 5.11)?

Сопротивление шунта можно найти, если известны напряжение на шунте и сила тока в нем. Применяя формулы для параллельного соединения проводников (50.7) и (50.8), получаем $I_{\text{ш}} = I_{\text{ц}} - I_a = (n-1)I_a$ и $\frac{I_{\text{ш}}}{I_a} = \frac{R_a}{R_{\text{ш}}}$.

Решая эти уравнения, найдем сопротивление шунта:

$$R_{\text{ш}} = R_a \frac{I_a}{I_{\text{ц}} - I_a} = \frac{R_a}{n-1}. \quad (50.10)$$

Отсюда следует, что если амперметром, рассчитанным на силу тока, например, до 1 А, нужно измерить токи, в 10 раз большие ($n=10$), то сопротивление шунта должно быть меньше сопротивления амперметра в 9 раз. При этом цена каждого деления увеличивается в 10 раз.

Дополнительное сопротивление к вольтметру. Чтобы увеличить пределы измерения напряжения вольтметром, последовательно ему подключают дополнительный резистор.

Определим, например, каким должно быть сопротивление резистора R_2 (рис. 5.12), чтобы вольтметром, рассчитанным на максимальное напряжение U_v , можно было измерять напряжение U на резисторе R_1 , в n раз большее ($U = nU_v$).

Так как резистор R_2 соединен последовательно с вольтметром, то сумма напряжений на нем и вольтметре равна измеряемому напряжению:

$$U_v + U_d = U,$$

где U_d — напряжение на резисторе R_2 .

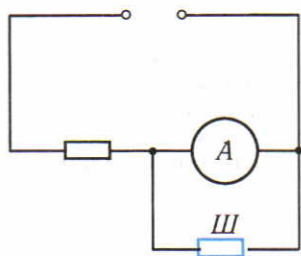


рис. 5.11

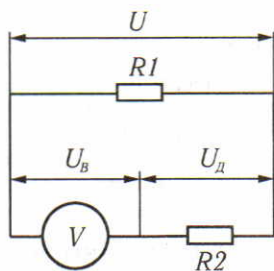


рис. 5.12

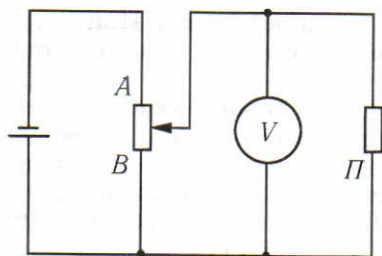


рис. 5.13

Напряжения же на вольтметре и резисторе R_2 пропорциональны их сопротивлениям:

$$\frac{U_B}{U_d} = \frac{R_B}{R_d}.$$

Отсюда

$$R_d = \frac{U_d}{U_B} R_B.$$

Подставив в это выражение значение U_d , получим

$$R_d = \frac{U - U_B}{U_B} R_B = (n - 1) R_B. \quad (50.11)$$

Обычно в технических приборах шунты к амперметрам и дополнительные сопротивления к вольтметрам находятся внутри самих приборов.

Для изменения силы тока в электрической цепи используется прибор, называемый *реостатом*. Реостат включается в электрическую цепь последовательно, регулирование силы тока в цепи осуществляется путем изменения электрического сопротивления реостата при перемещении скользящего контакта по его проволоочной обмотке.

Для регулирования напряжения, подаваемого на элемент Π электрической цепи, используется прибор, называемый *потенциометром*. Потенциометр представляет собой резистор со скользящим контактом. Концы A и B потенциометра присоединяют к полюсам источника тока, а прибор Π — к одному из концов потенциометра и выводу от скользящего контакта (рис. 5.13).

При таком включении прибора к нему будет подводиться часть напряжения, которое создается источником тока на концах потенциометра. Потенциометр применяется для регулировки громкости звучания радиоприемников, магнитофонов, яркости свечения телевизионной трубки и в ряде других радиоэлектронных устройств.

Вопросы

1. Докажите, что при последовательном соединении проводников их общее электрическое сопротивление равно сумме электрических сопротивлений всех проводников. 2. Докажите, что при параллельном включении проводников обратная величина общего сопротивления цепи равна сумме обратных величин сопротивлений всех параллельно включенных проводников.

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1. К источнику тока с ЭДС $\mathcal{E} = 6$ В и внутренним сопротивлением $r = 0,5$ Ом присоединены два резистора с сопротивлениями $R_1 = 2$ Ом и

$R_2 = 1,5$ Ом, соединенные последовательно, и амперметр (рис. 5.14). Сопротивлением амперметра пренебречь.

а) Какую силу тока показывает амперметр?

б) Каковы будут показания амперметра, если параллельно первому резистору будет присоединен еще один с сопротивлением $R_3 = 2$ Ом?

Решение. а) Внешняя цепь состоит из двух последовательно соединенных проводников, сопротивления которых R_1 и R_2 :

$$R_{1,2} = R_1 + R_2.$$

По закону Ома для полной цепи сила тока равна $I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$, откуда $I = \frac{\mathcal{E}}{R_1 + R_2 + r} = \frac{6}{2 + 1,5 + 0,5} \text{ А} = 1,5 \text{ А}$.

б) Если сопротивление параллельно соединенных проводников обозначить $R_{1,3}$, то все внешнее сопротивление

$$R = R_{1,3} + R_2.$$

Сопротивление $R_{1,3}$ находим из формулы

$$\frac{1}{R_{1,3}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3}; \quad R_{1,3} = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3}.$$

Следовательно,

$$R = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3} + R_2.$$

Тогда

$$I = \frac{\mathcal{E}}{\frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3} + R_2 + r} = 2 \text{ А}.$$

Задача 2. В цепь, состоящую из аккумулятора и резистора сопротивлением $R = 10$ Ом, включают вольтметр сначала последовательно, а затем параллельно резистору (рис. 5.15, а, б). Оба показания вольтметра оказываются одинаковыми. Сопротивление вольтметра $R_v = 1$ кОм. Каково внутреннее сопротивление аккумулятора?

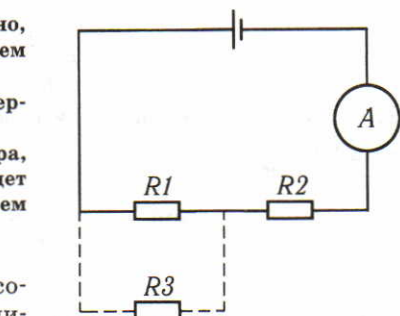
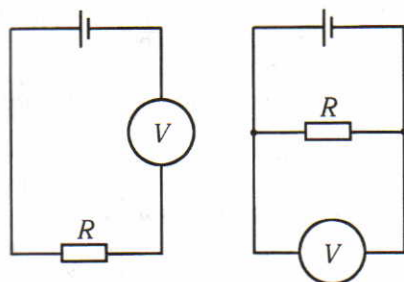


рис. 5.14



а)

б)

рис. 5.15

Решение. По закону Ома для полной цепи сила тока для каждого из случаев соответственно равна:

$$I_1 = \frac{\mathcal{E}}{R + R_v + r};$$

$$I_2 = \frac{\mathcal{E}}{\frac{RR_B}{R+R_B} + r} = \frac{\mathcal{E}(R+R_B)}{RR_B + Rr + R_B r}.$$

Напряжение на вольтметре в обоих случаях одинаково: $U_1 = U_2$, но $U_1 = IR_B = \frac{\mathcal{E}R_B}{R+R_B+r}$;

$$U_2 = \frac{I_2 RR_B}{R+R_B} = \frac{\mathcal{E}(R+R_B)}{RR_B + Rr + R_B r} \cdot \frac{RR_B}{R+R_B} = \frac{\mathcal{E}RR_B}{RR_B + Rr + R_B r}.$$

Поэтому

$$\frac{\mathcal{E}R_B}{R+R_B+r} = \frac{\mathcal{E}RR_B}{RR_B + Rr + R_B r}; \quad \frac{1}{R+R_B+r} = \frac{R}{RR_B + Rr + R_B r}.$$

После преобразования получим

$$R^2 = R_B r, \text{ т. е. } r = \frac{R^2}{R_B} = 0,1 \text{ Ом.}$$

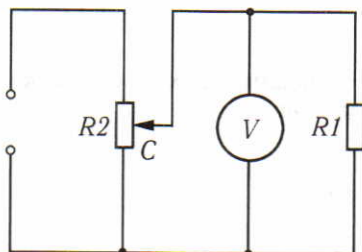


рис. 5.16

Задача 3. Резистор $R1$ сопротивлением $R_1 = 150$ Ом включают в сеть с напряжением 220 В при помощи потенциометра. Сопротивление потенциометра $R_2 = 600$ Ом. Каково будет напряжение между концами резистора, когда ползунок расположен посредине обмотки потенциометра (рис. 5.16)?

Решение. Когда ползунок находится в точке C , проводник оказывается включенным параллельно половине обмотки потенциометра, сопротивление которой $R_3 = \frac{R_2}{2}$.

Общее сопротивление R этих параллельно соединенных проводников найдем из формулы

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{R_1} + \frac{2}{R_2} = R_2 + 2R_1;$$

$$R = \frac{R_1 R_2}{2R_1 + R_2} = \frac{150 \cdot 600}{300 + 600} \text{ Ом} = 100 \text{ Ом.}$$

В сеть оказываются включенными последовательно два участка с сопротивлениями $R_2/2$ и R . Напряжения на этих участках распределяются пропорционально их сопротивлениям:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_2}{2R} = \frac{600}{200} = 3, \quad U_1 = 3U_2;$$

а сумма напряжений равна напряжению между концами цепи:

$$U_1 + U_2 = U = 220 \text{ В.}$$

Отсюда следует:

$$3U_2 + U_2 = 220 \text{ В и } U_2 = 55 \text{ В.}$$

Задачи для самостоятельного решения

50.1. Определите общее сопротивление внешнего участка электрической цепи, схематически показанной на рисунке 5.17.

50.2. Определите общее сопротивление внешнего участка электрической цепи, схематически показанной на рисунке 5.18.

50.3. Вольтметр с верхним пределом измерений напряжения 10 В имеет внутреннее сопротивление 5 кОм. Каким сопротивлением должен обладать дополнительный резистор для того, чтобы при его подключении верхний предел измерений стал равен 100 В?

50.4. Амперметр с верхним пределом измерения силы тока 10 А имеет внутреннее сопротивление 1 Ом. Каким сопротивлением должен обладать шунт для того, чтобы при его подключении верхний предел измерений амперметра стал равным 100 А?

50.5. Школьный вольтметр, рассчитанный на напряжение до 6 В, имеет сопротивление 700 Ом. Определите, какое дополнительное сопротивление должно быть к нему присоединено, чтобы с помощью этого вольтметра можно было измерять напряжение до 120 В. Во сколько раз при этом изменится цена деления вольтметра? Рассчитайте, какой длины должен быть взят провод из имеющихся в кабинете физики (с большим удельным сопротивлением) для изготовления такого дополнительного сопротивления.

50.6. До какого напряжения зарядится конденсатор C , присоединенный к источнику тока с ЭДС 3,6 В и внутренним сопротивлением 1 Ом по схеме, изображенной на рисунке 5.19? Какой заряд будет при этом на обкладках конденсатора, если его емкость равна 2 мкФ? $R_1 = 4$ Ом, $R_2 = 7$ Ом, $R_3 = 3$ Ом.

50.7. Два одинаковых проводника сопротивлением $R = 100$ Ом каждый соединены параллельно; последовательно к ним присоединен проводник сопротивлением $R_1 = 200$ Ом и параллельно — конденсатор емкостью $C = 10$ мкФ. Цепь подключена к источнику постоянного тока. Определите ЭДС источника, если заряд на конденсаторе $q = 2,2 \cdot 10^{-4}$ Кл. Внутренним сопротивлением источника и сопротивлением проводов пренебречь.

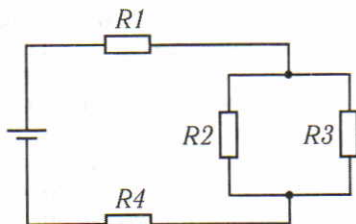


рис. 5.17

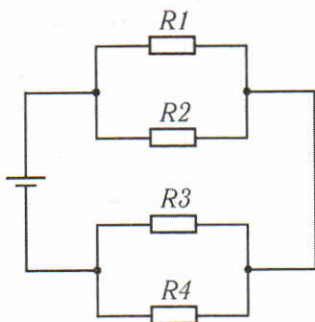


рис. 5.18

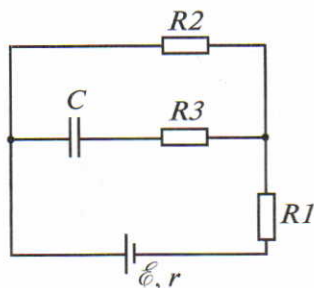


рис. 5.19

§ 51 Правила Кирхгофа

Пользуясь законом Ома, можно рассчитать силу тока на любом участке цепи. Проще всего рассчитывается сила тока в том случае, если внешняя цепь не содержит источников ЭДС.

Расчеты разветвленных цепей, содержащих источники ЭДС, значительно сложнее. В соответствии с законом Ома для таких участков цепи в этих случаях требуются знания трех величин: разности потенциалов на концах этого участка, ЭДС источника тока на этом участке и его полного сопротивления, включая внутреннее сопротивление источника тока. Для упрощения расчета сложных электрических цепей Г. Р. Кирхгофом на основе использования закона Ома сформулированы правила, называемые *правилами Кирхгофа*.

Рассмотрим цепь, в некоторых точках которой (1 и 3) соединяются три проводника (рис. 5.20). Точки разветвленной цепи, в которых сходятся не менее трех проводников, называются *узлами* цепи.

В узлах не может происходить накопление зарядов или разрыв потока упорядоченно движущихся частиц. Суммарный ток, втекающий в узел, равен суммарному току, вытекающему из узла.

Если ток втекает в узел, то силу тока считают положительной величиной, если вытекает из узла, то отрицательной.

Первое правило Кирхгофа относится к узлам и формулируется следующим образом:

алгебраическая сумма сил токов для каждого узла равна нулю:

$$I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n = 0. \quad (51.1)$$

В рассматриваемом случае (см. рис. 5.21) I_1 и I_2 — величины положительные, а I_3 , I_4 и I_5 — отрицательные.

Второе правило Кирхгофа относится к отдельным замкнутым контурам цепи: алгебраическая сумма ЭДС в замкнутом контуре равна алгебраической сумме произведений сил токов и сопротивлений каждого из участков этого контура.

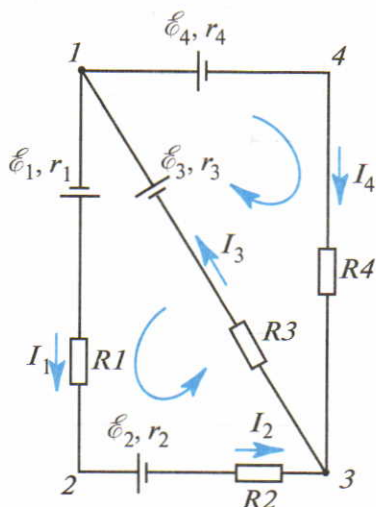


рис. 5.20

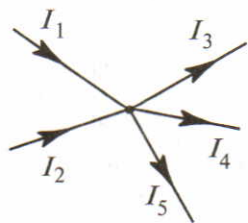


рис. 5.21

Рассмотрим замкнутый контур 1, 2, 3 (см. рис. 5.20).

Чтобы учесть знаки ЭДС и сил токов на каждом участке цепи, выберем направление обхода контура. На рисунке 5.20 это направление указано стрелкой. Если на данном участке источник тока создает ток, совпадающий по направлению с выбранным направлением обхода контура, то ЭДС считается положительной, в противном случае — отрицательной.

Аналогично, если произвольно выбранное направление тока совпадает с направлением обхода, то силу тока считают положительной, в противном случае — отрицательной. О правильности выбранного знака силы тока судят по окончательному знаку, полученному в результате вычислений.

Применив первое правило Кирхгофа к узлу 1 и второе правило к контурам 1, 2, 3, 1 и 1, 4, 3, 1, получим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 = I_1(R_1 + R_2 + r_1 + r_2) + I_3(R_3 + r_3); \\ \mathcal{E}_3 - \mathcal{E}_4 = I_4(R_4 + r_4) + I_3(R_3 + r_3); \\ I_3 - I_1 - I_4 = 0. \end{cases} \quad (51.2)$$

Мы получили линейную систему из трех уравнений с тремя неизвестными значениями сил токов I_1 , I_3 , I_4 . Решение этой системы при известных числовых значениях ЭДС и сопротивлений не вызывает трудностей.

Применение правил Кирхгофа. При использовании правил Кирхгофа надо иметь в виду:

1. Число составляемых уравнений должно соответствовать числу неизвестных.
2. Составляя уравнения, надо следить, чтобы в каждое последующее уравнение входила хотя бы одна неизвестная величина, которая не входила в предыдущие уравнения.
3. Для каждого контура направление его обхода, определяющее знаки сил токов и ЭДС, выбирают произвольно. Если в результате решения задачи получают отрицательное значение для силы тока на каком-то участке, то это означает, что ток на этом участке идет в направлении, противоположном выбранному обходу контура.

Вопросы

1. Следствием чего является первое правило Кирхгофа? второе правило Кирхгофа? 2. Какие требования следует учитывать, применяя правила Кирхгофа к расчету цепей?

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Задача. На рисунке 5.22 показана схема цепи, собранной для зарядки аккумулятора. Источник тока имеет ЭДС $\mathcal{E}_1 = 22$ В и внутреннее сопротивление $r_1 = 0,2$ Ом. ЭДС заряжаемого аккумулятора $\mathcal{E}_2 = 10$ В и его внутреннее сопротивление $r_2 = 0,6$ Ом. В цепь включены переменный резистор сопротивлением $R = 10$ Ом и осветительная лампа сопротивлением $R_3 = 48$ Ом. Рассчитайте силы токов во всех участках цепи.

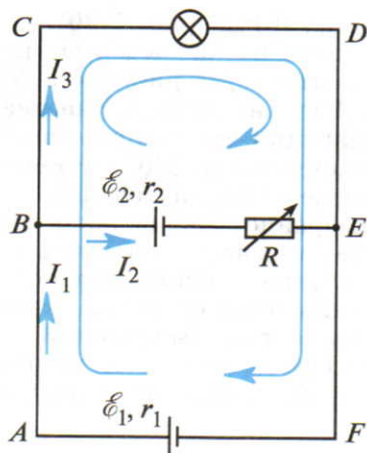


рис. 5.22

Решение. Направления токов в узлах и выбранные направления обхода контуров показаны на рисунке 5.22.

Из первого правила Кирхгофа в применении к узлу B следует:

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0. \quad (1)$$

В уравнении для второго узла нет необходимости. Оно не даст ничего нового, так как в него войдут те же значения сил токов.

Второе правило Кирхгофа в применении к контурам BCDEB и ACDFA даст следующие уравнения:

$$\mathcal{E}_2 = I_3 R_3 - I_2(r_2 + R); \quad (2)$$

$$\mathcal{E}_1 = I_3 R_3 + I_1 r_1. \quad (3)$$

Отметим, что в составлении уравнения для контура ABEFA нет необходимости, так как в него не вошли бы новые величины.

Итак, получены три уравнения, в которые входят три искомые величины. Решать их в общем виде нет смысла, поскольку они относятся к конкретной задаче. Поэтому, подставив числовые значения известных величин, получим $I_1 - I_2 - I_3 = 0$; $48I_3 - 10,6I_2 = 10$; $48I_3 + 0,2I_1 = 22$.

Подставив в третье уравнение $I_1 = I_2 + I_3$, получим систему из двух уравнений с двумя неизвестными:

$$\begin{cases} 48I_3 - 10,6I_2 = 10; \\ 48,2I_3 + 0,2I_2 = 22. \end{cases}$$

Умножив первое уравнение на 0,2, а второе — на 10,6, имеем

$$\begin{aligned} 9,6I_3 - 2,12I_2 &= 2; \\ 510,92I_3 + 2,12I_2 &= 233,2. \end{aligned}$$

Сложив оба уравнения, исключим I_2 . Следовательно, $520,52I_3 = 235,2$.

Отсюда $I_3 = 0,452$ А.

Подставив это значение в любое из уравнений, содержащее I_2 , получим $9,6 \cdot 0,452 - 2,12I_2 = 2$, откуда $I_2 = 1,10$ А. Сила тока через источник тока $I_1 = I_2 + I_3 = 1,55$ А.

Задачи для самостоятельного решения

51.1. Два источника тока с ЭДС $\mathcal{E}_1$ и $\mathcal{E}_2$ и внутренними сопротивлениями r_1 и r_2 включены так, как показано на рисунке 5.23. Найдите силы токов через источники и силу тока через перемычку AB, сопротивление которой принять равным нулю.

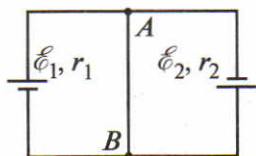


рис. 5.23

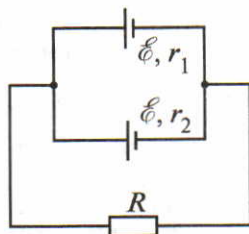


рис. 5.24

51.2. Два гальванических элемента, ЭДС которых одинаковы и равны $\mathcal{E} = 2$ В, соединены параллельно и замкнуты на резистор R (рис. 5.24). Внутренние сопротивления элементов равны соответственно $r_1 = 1$ Ом и $r_2 = 2$ Ом. Чему равно сопротивление резистора R , если сила тока в первом элементе равна $I_1 = 1$ А? Найдите силы токов во втором элементе и резисторе.

51.3. Какой заряд q пройдет через ключ при его замыкании (рис. 5.25)?

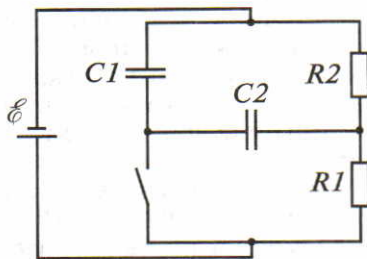


рис. 5.25

§ 52

Работа и мощность тока

Работа и мощность электрического тока. Если через проводник с электрическим сопротивлением R в течение времени t протекает постоянный электрический ток I , то работа сил электрического поля (или работа электрического тока) за это время равна:

$$A = qU = IUt = I^2Rt = \frac{U^2t}{R}. \quad (52.1)$$

Мощность P электрического тока отсюда равна:

$$P = \frac{A}{t} = IU = I^2R = \frac{U^2}{R}. \quad (52.2)$$

Единицей работы электрического тока в СИ является джоуль, единицей мощности — ватт:

$$1 \text{ Дж} = 1 \text{ Кл} \cdot 1 \text{ В}, \quad 1 \text{ Вт} = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ с}} = 1 \text{ А} \cdot 1 \text{ В}.$$

Тепловое действие электрического тока. Если электрический ток протекает в цепи, где не происходят химические реакции и не совершается механическая работа, то энергия электрического поля превращается во внутреннюю энергию проводника и его температура возрастает. Путем теплообмена эта энергия в форме теплоты передается окружающим бо-

лее холодным телам. Из закона сохранения энергии следует, что количество теплоты равно работе электрического тока:

$$Q = A = I^2 R t = \frac{U^2 t}{R}. \quad (52.3)$$

Этот закон независимо друг от друга установили опытным путем Дж. Джоуль и Э. Х. Ленц. Он называется *законом Джоуля — Ленца*.

Тепловое действие электрического тока находит широкое применение в быту и технике — лампы накаливания, электрические плиты, кипятильники, печи для плавления металлов и т. д.

Почему необходимо высокое напряжение при передаче электрической энергии на большие расстояния? Электрический ток можно передавать по проводам на большие расстояния — от электростанций к потребителям. При этом неизбежны потери энергии на нагревание проводов. В линиях электропередачи (ЛЭП) большой протяженности эти потери могут быть очень велики, если не принять специальных мер для их уменьшения. Выясним, от чего зависят эти потери и как можно их уменьшить.

Допустим, что P — это мощность, которая передается от электростанции к потребителю, а P_1 — мощность, которая теряется в проводах.

Мощность P_1 равна:

$$P_1 = I^2 R,$$

где R — сопротивление проводов; I — сила тока в линии.

Силу тока в линии можно определить по передаваемой мощности:

$$I = \frac{P}{U},$$

где U — напряжение на полюсах источника, т. е. напряжение между проводами в начале линии передачи.

Подставив значение силы тока в формулу $P_1 = I^2 R$ и заменив сопротивление проводов двухпроводной ЛЭП по формуле $R = 2l\rho/S$, получаем

$$P_1 = \frac{P^2 R}{U^2} = \frac{2\rho l P^2}{S U^2}. \quad (52.4)$$

Формула (52.4) показывает, что мощность, которая теряется в проводах, зависит от напряжения U и площади сечения проводов S . Расстояние l от генератора до потребителя и передаваемая мощность P для данной ЛЭП являются заданными величинами, для проводов используется медь или алюминий.

Возможности снижения потерь за счет увеличения площади сечения ограничены из-за повышения стоимости линии и массы проводов. Поэтому потери уменьшают за счет повыше-

ния напряжения. В мощных линиях передач допустимыми считаются потери не более 8%, т. е. $\alpha = P_1/P = 0,08$.

■ Вопрос

Почему с повышением напряжения уменьшаются потери в линии электропередачи?

■ ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Задача. Чему должна быть равна площадь сечения алюминиевых проводов для передачи энергии на 1000 км, если передаваемая мощность составляет 1 ГВт; напряжение в линии электропередачи равно 500 кВ, а часть мощности, теряемой в проводах, $\alpha = 0,08$? Для алюминия $\rho = 2,8 \times 10^{-8}$ Ом · м. Какой должна быть площадь сечения проводов той же линии при напряжении 250 В?

Решение. Из формулы (52.4) получаем

$$S = \frac{2\rho l P^2}{P_1 U^2} = \frac{2\rho l P}{\alpha U^2} = \frac{2 \cdot 2,8 \cdot 10^{-8} \cdot 10^6 \cdot 10^9}{0,08 \cdot 25 \cdot 10^{10}} \text{ м}^2 = 2,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 = 28 \text{ см}^2.$$

При напряжении 250 В, т. е. в 2000 раз меньшем, площадь сечения проводов при тех же потерях должна быть в $4 \cdot 10^6$ раз больше, т. е. $S \approx 11000 \text{ м}^2$, что совершенно нереально!

■ Задачи для самостоятельного решения

52.1. Какой должна быть площадь сечения алюминиевых проводов, по которым от генератора с ЭДС 70 В подается ток к сварочному аппарату? Для нормальной работы сварочного аппарата на нем должно поддерживаться напряжение 50 В. Потребляемая аппаратом мощность 1 кВт; расстояние от него до генератора 20 м; внутреннее сопротивление генератора 0,05 Ом; удельное сопротивление алюминия равно $2,8 \cdot 10^{-8}$ Ом · м.

52.2. Резистор с электрическим сопротивлением 2 МОм рассчитан на рассеяние мощности 2 Вт. Вычислите максимально допустимые значения силы тока и напряжения для этого резистора.

52.3. Постройте график зависимости мощности, выделяемой на внешнем участке цепи, от сопротивления этого участка, если ЭДС источника 4,5 В, а его внутреннее сопротивление 2 Ом.

52.4. Докажите, что мощность, выделяемая на внешнем участке цепи, максимальна при равенстве электрического сопротивления внешнего участка цепи внутреннему сопротивлению источника.

52.5. К источнику тока с ЭДС $\mathcal{E} = 10$ В и внутренним сопротивлением $r = 1$ Ом подключена система из четырех резисторов сопротивлением $R = 1$ Ом каждый. Как нужно соединить эти резисторы, чтобы в них выделилась максимальная мощность?

52.6. Суммарная мощность, выделяющаяся на резисторах, сопротивления которых $R_1 = 8$ Ом и $R_2 = 2$ Ом, одинакова при их последовательном и параллельном подключении к источнику тока. Найдите внутреннее сопротивление источника тока, питающего эти резисторы.



Магнитное взаимодействие. Явления взаимного притяжения разноименных и отталкивания одноименных электрических зарядов во многом сходны с явлениями притяжения разноименных и отталкивания одноименных полюсов магнита. Однако попытки установить связь между электрическими и магнитными явлениями долгое время оставались безуспешными.

В 1820 г. датский физик Х. Эрстед заметил, что магнитная стрелка поворачивается при пропускании электрического тока через проводник, находящийся около нее (рис. 6.1). В том же году французский физик А. Ампер установил, что два проводника, расположенные параллельно друг другу, испытывают взаимное притяжение при пропускании через них электрического тока в одном направлении и отталкиваются, если токи текут в противоположных направлениях (рис. 6.2).

На основании этих опытов Ампер пришел к выводу, что взаимодействие тока с магнитом и магнитов между собой можно объяснить, если предположить, что внутри магнита существуют незатухающие молекулярные круговые токи. Тогда все магнитные явления объясняются взаимодействием движущихся электрических зарядов, никаких особых магнитных зарядов в природе нет.

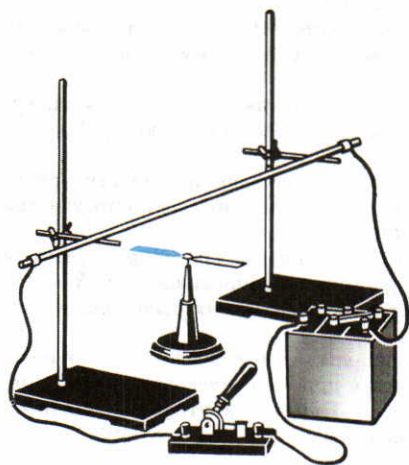


рис. 6.1

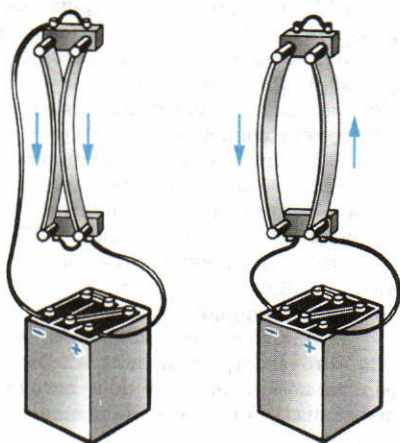


рис. 6.2

Притяжение или отталкивание электрически нейтральных проводников при пропускании через них электрического тока называют *магнитным взаимодействием* токов или электродинамическим взаимодействием.

Вспомним, что электрический ток — это упорядоченное движение электрических зарядов (см. § 48). Следовательно, магнитное взаимодействие — это взаимодействие упорядоченно движущихся электрических зарядов.

Магнитное поле. Магнитное взаимодействие движущихся электрических зарядов, согласно представлениям теории поля, объясняется тем, что всякий движущийся электрический заряд создает в окружающем пространстве магнитное поле, способное действовать на другие движущиеся электрические заряды.

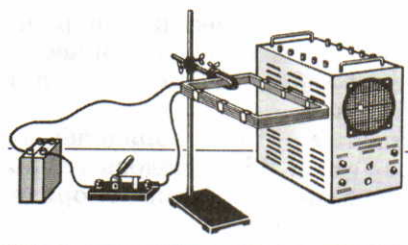
Единица силы тока. Прохождение электрического тока может сопровождаться нагреванием и свечением вещества, различными его химическими превращениями, магнитным взаимодействием. Из всех действий электрического тока только магнитное действие наблюдается всегда и при любых условиях. Поэтому магнитное взаимодействие проводников с током используется в Международной системе (СИ) для определения единицы силы тока — ампера. Приведем принятое в настоящее время определение этой единицы.

Ампер — сила неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого кругового сечения, расположенным на расстоянии 1 м один от другого в вакууме, вызвал бы между этими проводниками силу магнитного взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н на каждый метр длины.

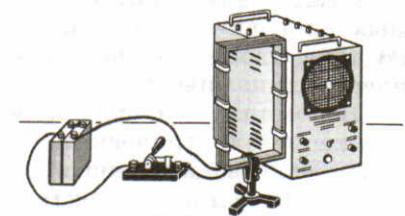
Сила, с которой магнитное поле действует на проводник с током, называется *силой Ампера*.

Сила Ампера. Экспериментальное изучение магнитного взаимодействия показывает, что сила Ампера зависит от ориентации проводника в магнитном поле.

Для создания магнитного поля будем пропускать постоянный ток через провод, намотанный на прямоугольную рамку, а для обнаружения действия силы Ампера используем пучок электронов, летящих в электронно-лучевой трубке осциллографа. Такой пучок электронов эквивалентен проводнику с током. Опыт показывает, что при расположении электронного пучка параллельно проводнику с током (длинной стороне рамки) этот пучок смещается к проводнику с током, если электроны в проводнике движутся в том же направлении, что и электроны в трубке (рис. 6.3, а). При противоположном направлении тока электронный пучок отталкивается от проводника с током.



а)



б)

рис. 6.3

При плавном изменении угла между электронным пучком и проводником с током плавно изменяется смещение яркого пятна (следа электронного пучка) на экране осциллографа. Этот опыт доказывает, что сила Ампера зависит от ориентации проводника в магнитном поле. Смещение пятна максимально при параллельном расположении электронного пучка и проводника с током, следовательно, сила Ампера в этом случае имеет максимальное значение. Если же электронный пучок перпендикулярен проводнику с током, то пятно на экране осциллографа не смещается, т. е. в этом случае магнитные силы на движущиеся электроны не действуют (рис. 6.3, б).

Магнитная индукция. Опыт также показывает, что сила Ампера пропорциональна силе тока в проводнике I и длине l той части проводника, которая находится в магнитном поле. Для максимального значения силы Ампера справедливо выражение

$$F_{\max} = BIl, \quad (53.1)$$

где B — физическая величина, являющаяся силовой характеристикой магнитного поля. Она называется *магнитной индукцией* (или индукцией магнитного поля).

Магнитная индукция — векторная величина. Модуль вектора магнитной индукции равен отношению максимального значения силы Ампера, действующей на прямой проводник с током, к силе тока в проводнике и его длине:

$$B = \frac{F_{\max}}{Il}. \quad (53.2)$$

Единица магнитной индукции. В Международной системе единиц за единицу магнитной индукции принята индукция такого магнитного поля, в котором на каждый метр длины проводника при силе тока 1 А действует максимальная сила Ампера 1 Н. Эта единица называется тесла (сокращенно: Тл) в честь выдающегося югославского физика Н. Тесла:

$$1 \text{ Тл} = \frac{1 \text{ Н}}{1 \text{ А} \cdot 1 \text{ м}} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}}.$$

Направление вектора магнитной индукции. Направление вектора индукции $\vec{B}$ определяется *правилом левой руки*. Нужно расположить прямолинейный проводник в магнитном поле таким образом, чтобы сила Ампера имела максимальное значение. Раскрытую ладонь левой руки поместим в плоскости, проходящей через вектор силы Ампера и проводник с током. Четыре пальца руки расположим по направлению тока в проводнике, а большой палец, отогнутый в плоскости ладони под прямым углом к остальным четырем пальцам, — по направлению силы Ампера. Тогда вектор индукции будет входить перпендикулярно в плоскость ладони (рис. 6.4).

Правило левой руки можно использовать для определения направления вектора силы Ампера, если известны направления тока в проводнике и вектора магнитной индукции.

Зависимость силы Ампера от угла между вектором магнитной индукции и проводником. Опыт показывает, что если расположить проводник с током под углом α к вектору магнитной индукции $\vec{B}$, то модуль силы Ампера определяется выражением

$$F_A = IBl \sin \alpha. \quad (53.3)$$

Следовательно, на проводник с током, расположенный вдоль вектора магнитной индукции, сила Ампера не действует.

Линии магнитной индукции. Линия, в любой точке которой вектор магнитной индукции $\vec{B}$ направлен по касательной к ней, называется *линией магнитной индукции*.

Линии магнитной индукции около прямого проводника с током являются окружностями, лежащими в плоскости, перпендикулярной проводнику; центры этих окружностей находятся на оси проводника (рис. 6.5).

Направление вектора магнитной индукции прямого проводника с током определяется следующим mnemonicским

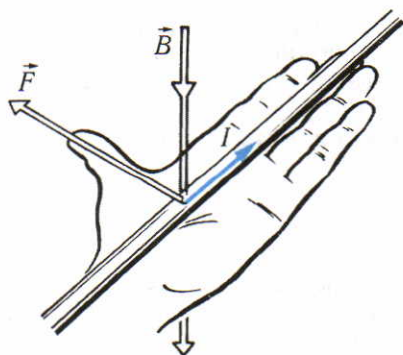


рис. 6.4

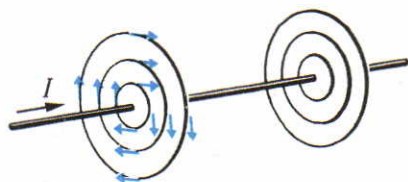


рис. 6.5



рис. 6.6

в направлении хода часовой стрелки.

Однородное магнитное поле. Если в некоторой области пространства вектор индукции магнитного поля имеет одинаковое значение по модулю и одинаковое направление во всех точках поля, то магнитное поле в этом пространстве называется *однородным* (рис. 6.6).

Магнитный поток. Произведение модуля вектора индукции на площадь ΔS участка поверхности, перпендикулярной вектору индукции, называется *поток вектора магнитной индукции* или *магнитным потоком* Φ .

В случае расположения вектора индукции под углом α к поверхности в однородном магнитном поле магнитный поток через плоскую площадку равен:

$$\Phi = BS \cos \alpha. \quad (53.4)$$

За единицу магнитного потока в СИ принят вебер (сокращенно: Вб). 1 Вб — это магнитный поток через поверхность площадью 1 м^2 , расположенную в однородном магнитном поле перпендикулярно вектору индукции $\vec{B}$, равному по модулю 1 Тл:

$$1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot 1 \text{ м}^2 = 1 \text{ Тл} \cdot \text{м}^2.$$

В магнитных полях линии индукции всегда замкнуты сами на себя, образуя вихревое поле. В результате замкнутая поверхность, помещенная в магнитное поле, пронизывается линиями магнитной индукции так, что любая линия, входящая в эту поверхность, выходит из нее. Следовательно, полный магнитный поток через произвольную замкнутую поверхность равен нулю. Полученный результат является следствием того факта, что в природе нет магнитных зарядов и магнитные поля образуются только электрическими токами.

■ Вопросы

1. Как взаимодействуют между собой параллельные проводники с током? 2. Как Ампер объяснял взаимодействие постоянных магнитов? 3. Какое явление используется для определения единицы силы тока в СИ? 4. Как определяется модуль вектора магнитной индукции? 5. В каких единицах выражается магнитная индукция? 6. Как определяется направление вектора

магнитной индукции? 7. По какому правилу можно определить направление силы Ампера? 8. Что такое линия магнитной индукции? 9. Какую форму имеют линии индукции магнитного поля, созданного прямолинейным проводником с током? 10. Какое магнитное поле называется однородным? 11. Что называется магнитным потоком? 12. Что является единицей магнитного потока?

■ Задачи для самостоятельного решения

53.1. С какой силой действует однородное магнитное поле с индукцией 2,5 Тл на проводник длиной 50 см, расположенный под углом 30° к вектору индукции, при силе тока в проводнике 0,5 А?

53.2. Какой должна быть сила тока в обмотке якоря электродвигателя для того, чтобы на участок обмотки из 20 витков длиной 10 см, расположенный перпендикулярно вектору индукции в магнитном поле, действовала сила 120 Н? Магнитная индукция равна 1,5 Тл.

53.3. На прямолинейный участок проводника с током длиной 2 см между полюсами постоянного магнита действует сила 10^{-3} Н при силе тока в проводнике 5 А. Определите магнитную индукцию, если вектор индукции перпендикулярен проводнику.

§ 54 Магнитное поле тока

Магнитная индукция прямого проводника с током. Опыт показывает, что сила Ампера, действующая со стороны магнитного поля, созданного очень длинным прямым проводником с током, на параллельный ему второй проводник с током, пропорциональна не только длине l второго проводника и силе тока I_2 в нем. Она также пропорциональна силе тока I_1 в первом проводнике и обратно пропорциональна расстоянию r между проводниками (рис. 6.7):

$$F = k' \frac{I_1 I_2 l}{r}. \quad (54.1)$$

При параллельном расположении проводников сила Ампера максимальна. Ее можно выразить через модуль индукции $\vec{B}$ магнитного поля, создаваемого электрическим током I_1 , силу тока I_2 во втором проводнике и длину l второго проводника:

$$F = I_2 B l. \quad (54.2)$$

Из формул (54.1) и (54.2) получаем, что магнитная индукция на расстоянии r от длинного прямого проводника с током I_1 определяется выражением

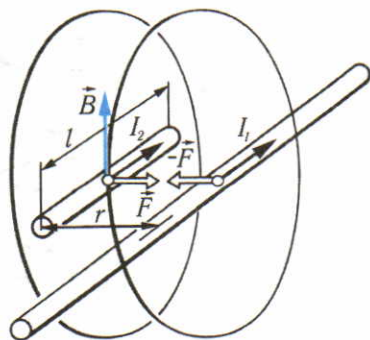


рис. 6.7

$$B = \frac{k'I_1}{r}. \quad (54.3)$$

Коэффициент k' можно найти, воспользовавшись определением единицы силы тока (см. § 53). Согласно определению ампера, сила взаимодействия равна $2 \cdot 10^{-7}$ Н, если $l=r=1$ м и $I_1=I_2=1$ А.

Подставляя эти значения в выражение (54.1), получаем

$$2 \cdot 10^{-7} \text{ Н} = \frac{k' \cdot 1 \text{ А} \cdot 1 \text{ А} \cdot 1 \text{ м}}{1 \text{ м}}, \quad (54.4)$$

откуда $k' = 2 \cdot 10^{-7} \text{ Н/А}^2$.

Магнитная постоянная. Вместо коэффициента k' в расчетах в Международной системе единиц пользуются *магнитной постоянной* μ_0 , которая связана с коэффициентом k' соотношением

$$k' = \mu_0 / 2\pi. \quad (54.5)$$

Отсюда магнитная постоянная равна:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Н/А}^2 \approx 1,26 \cdot 10^{-6} \text{ Н/А}^2. \quad (54.6)$$

Таким образом, в СИ индукция магнитного поля на некотором расстоянии от прямого проводника с током I выражается так:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}. \quad (54.7)$$

Формула для силы взаимодействия параллельных проводников с током в СИ примет вид

$$F = \frac{\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi r}. \quad (54.8)$$

Магнитное поле катушки и кругового тока. Внутри соленоида — цилиндрической катушки, длина которой l значительно больше радиуса r витка, модуль вектора индукции равен:

$$B = \mu_0 I n = \mu_0 I N / l, \quad (54.9)$$

где N — общее число витков; $n = N/l$ — число витков провода на единицу длины катушки.

В центре кругового витка с током индукция магнитного поля равна:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2r}. \quad (54.10)$$

Вектор индукции магнитного поля как в катушке, так и в центре витка с током направлен вдоль их оси.

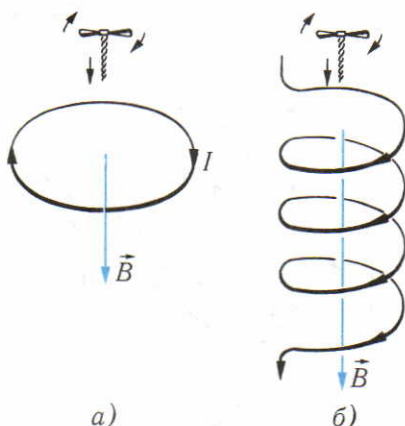


рис. 6.8

Направление вектора индукции связано с направлением тока мнемоническим *правилом буравчика* (правило Максвелла): если головка винта (буравчика) с правой резьбой вращается по направлению тока, то направление поступательного движения винта совпадает с направлением вектора индукции (рис. 6.8, а, б).

■ Вопросы

1. Как изменится сила магнитного взаимодействия между двумя длинными параллельными проводниками при уменьшении силы тока в каждом из них в два раза? 2. Как изменится сила взаимодействия между двумя параллельными проводниками с током при уменьшении расстояния между ними в два раза?

■ Задачи для самостоятельного решения

54.1. Какая сила действует на каждый метр длины воздушных проводов троллейбусной линии, расположенных на расстоянии 52 см друг от друга, если сила тока в проводах 2000 А?

54.2. Вычислите индукцию магнитного поля на расстоянии 5 см от прямолинейного участка канала молнии при силе тока в молнии $2 \cdot 10^4$ А.

54.3. Вычислите индукцию магнитного поля внутри цилиндрической катушки длиной 10 см, содержащей 200 витков провода, при силе тока в катушке 5 А.

§ 55 Сила Лоренца

Движение заряженных частиц в магнитном поле.

Если в проводнике длиной l упорядоченно движутся электрические заряды со средней скоростью v , то за время $t=l/v$ через поперечное сечение проводника пройдет суммарный электрический заряд $Q=It=Il/v$. На этот проводник в магнитном поле с индукцией B действует сила Ампера $F_A=IBl \sin \alpha$. Но $Il=Qv$, следовательно, если мы в выражении для силы Ампера заменим произведение Il на Qv , то получим выражение для силы, действующей на суммарный движущийся заряд: $F=QBv \sin \alpha$. Разделив обе части равенства на число движущихся зарядов, определим силу, действующую на заряд одной частицы $q=Q/N$:

$$F_m = qBv \sin \alpha, \quad (55.1)$$

где α — угол между векторами $\vec{v}$ и $\vec{B}$.

Направление силы $\vec{F}_m$ определяется правилом левой руки

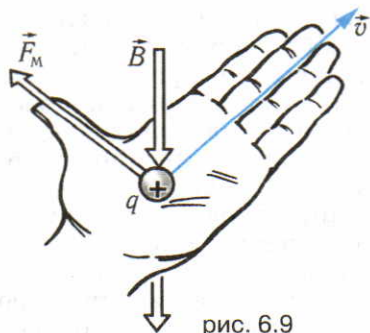


рис. 6.9

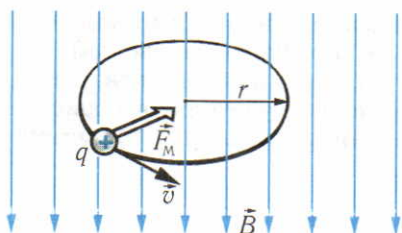


рис. 6.10

ниям индукции магнитного поля, действует сила $\vec{F}_m$, постоянная по модулю и направленная перпендикулярно вектору скорости (рис. 6.10). Под действием магнитной силы частица приобретает ускорение, модуль которого равен:

$$a = F_m/m = qBv/m.$$

В однородном магнитном поле эта частица движется по окружности. Радиус окружности, по которой движется частица, определяется из условия $a = v^2/r$, откуда следует: $qvB/m = v^2/r$, т. е.

$$r = \frac{mv}{qB}. \quad (55.2)$$

Период обращения частицы в однородном магнитном поле равен:

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi m}{qB}. \quad (55.3)$$

Последнее выражение показывает, что период обращения частицы в однородном магнитном поле не зависит от скорости и радиуса траектории ее движения. Этот факт используется, например, в ускорителе заряженных частиц — циклотроне.

Циклотрон. В этом ускорителе заряженные частицы — протоны, ядра атомов гелия (альфа-частицы) или ионизованные атомы других элементов разгоняются переменным электрическим полем постоянной частоты в вакууме в зазоре между двумя пустотелыми металлическими электродами специальной формы — дуантами. Дуанты находятся между полюсами постоянного электромагнита. Под действием магнитного поля внутри дуанта заряженные частицы движутся по дуге окружности. К моменту времени, когда они совершат половину оборота и подойдут к зазору между дуантами, направление вектора напряженности электрического поля между ними изменится на противоположное и частицы вновь испытают ускорение. Каждую следующую половину оборота частицы пролетают по окружности все большего радиуса (рис. 6.11), но период их обращения остае-

ся неизменным. Поэтому для ускорения частиц на дуанты подается переменное напряжение с постоянным периодом, равным периоду обращения частицы: $T_{\text{напр}} = T_{\text{обр}} = 2\pi m / (qB)$. Это равенство называется *условием синхронизации*.

Ускорение частиц в циклотроне с постоянным периодом возможно лишь до значений скоростей, значительно меньших скорости света в вакууме. С приближением скорости частицы к скорости света в вакууме, равной $c = 300\,000$ км/с, период ее обращения в магнитном поле возрастает. Равенство периода обращения частицы и периода изменения электрического поля, т. е. условие синхронизации, нарушается, ускорение частицы в циклотроне прекращается. Для ускорения частиц до скоростей, близких к скорости света в вакууме, служат другие ускорители — фазотроны, синхротроны, синхрофазотроны.

Движение заряженных частиц, влетающих в магнитное поле под любым углом к вектору индукции. Заряженная частица, влетающая в однородное магнитное поле со скоростью $\vec{v}$ под углом α к вектору индукции $\vec{B}$, движется по винтовой линии. Докажем это.

Разложим вектор скорости $\vec{v}$ на две составляющие — вектор $\vec{v}_{\parallel}$, направленный вдоль вектора индукции, и вектор $\vec{v}_{\perp}$, направленный перпендикулярно вектору индукции магнитного поля (рис. 6.12). Вдоль вектора $\vec{v}_{\parallel}$ на заряженную частицу никакие силы не действуют, и в этом направлении частица движется равномерно со скоростью $v_{\parallel} = v \cos \alpha$. На частицу действует сила, перпендикулярная составляющей $\vec{v}_{\perp}$. Под действием этой силы, равной по модулю $F_m = qBv_{\perp} = qBv \sin \alpha$, заряженная частица будет двигаться по окружности в плоскости, перпендикулярной вектору индукции.

Результирующая траектория будет иметь вид винтовой

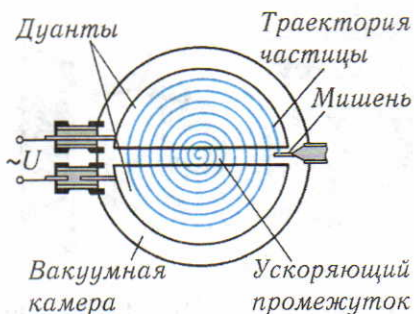


рис. 6.11

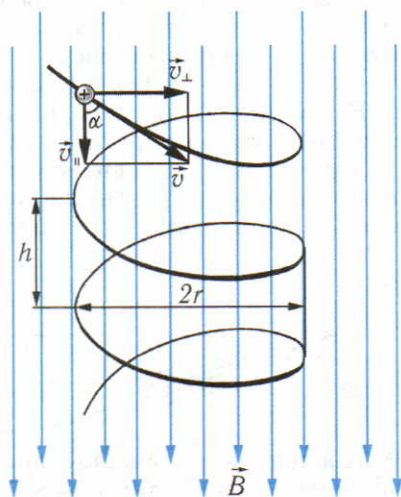


рис. 6.12

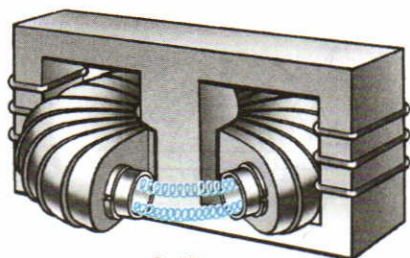


рис. 6.13

линии с радиусом обращения $r = \frac{mv_{\perp}}{qB} = \frac{mv \sin \alpha}{qB}$ [см. формулу (55.2)] и шагом винта $h = v_{\parallel} T = 2\pi mv \cos \alpha / (qB)$ [см. формулу (55.3)].

Данное явление находит применение в технике и играет важную роль в природе, в частности в астрофизических явлениях.

Приведем некоторые примеры.

Для осуществления управляемых термоядерных реакций необходимо, чтобы частицы высокотемпературной плазмы — практически полностью ионизованного газа — не сталкивались со стенками сосуда и тем самым не передавали им свою энергию. Для реализации этого условия физики И. Е. Тамм и А. Д. Сахаров в 1950 г. предложили использовать магнитную термоизоляцию.

В вакуумной кольцевой камере создается сильное магнитное поле, линии магнитной индукции которого направлены вдоль стенок камеры. Заряженные частицы движутся, как

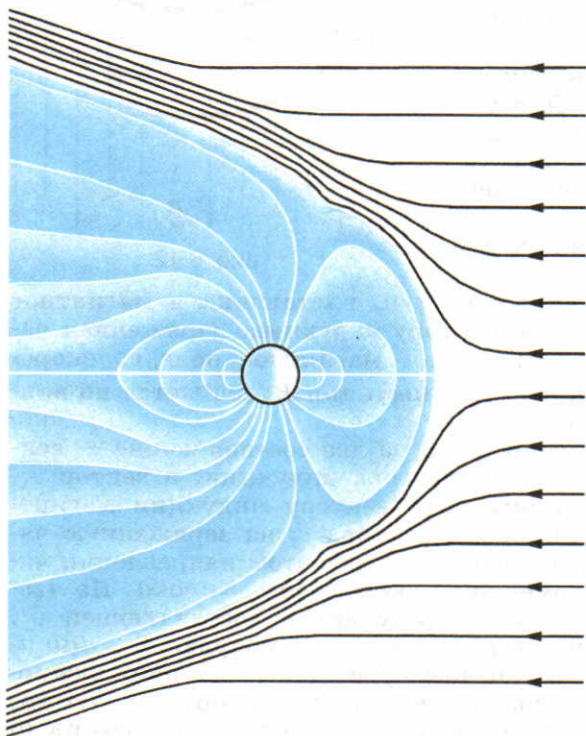


рис. 6.14

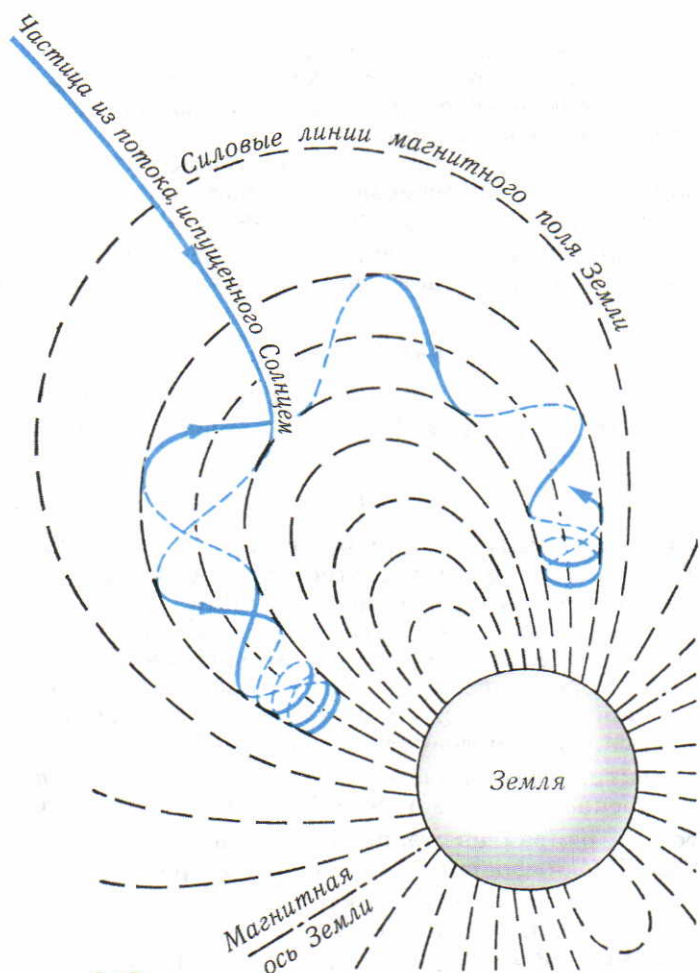


рис. 6.15

бы навиваясь на линии индукции, и не испытывают столкновений со стенками камеры (рис. 6.13). Такие камеры применяются в установках «Токамак» для получения плазмы, нагретой до десятков миллионов кельвин.

Своеобразной защитой для всего живого на Земле от потоков заряженных частиц из космоса является магнитное поле Земли. Быстрые заряженные частицы, электроны и протоны, выбрасываемые Солнцем, образуют так называемый солнечный ветер. В магнитном поле Земли траектории движения частиц изменяются, и они огибают Землю (рис. 6.14). На расстояниях примерно от 500 до 60 000 км заряженные частицы движутся, навиваясь на линии индукции магнитного поля Земли (рис. 6.15), совершая колебания от

одного полюса к другому за 0,1—1 с. Эта область космоса называется радиационным поясом Земли.

Лишь в полярных областях небольшая часть этих частиц вторгается в верхние слои атмосферы из радиационного пояса Земли и вызывает полярные сияния.

Сила Лоренца. В одной и той же области пространства могут одновременно существовать электрическое и магнитное поля, их действия на заряженные частицы независимы. Сила $\vec{F}_L$, действующая на заряженные частицы со стороны электрического и магнитного полей, называется *обобщенной силой Лоренца*:

$$\vec{F}_L = \vec{F}_e + \vec{F}_m. \quad (55.4)$$

В частном случае, если напряженность электрического поля равна нулю, то сила Лоренца $\vec{F}_L$ равна магнитной силе $\vec{F}_m$:

$$\vec{F}_L = qBv \sin \alpha. \quad (55.5)$$

Определение удельного заряда и массы иона. По траектории движущегося иона в соответствии с формулой (55.2) можно определить удельный заряд частицы q/m , а при известном заряде ее массу. Рассмотрим принцип действия прибора масс-спектрометра, схематически изображенного на рисунке 6.16. Через систему из трех диафрагм пропускается пучок положительно заряженных ионов, имеющих различные скорости. В пространстве между диафрагмами 1 и 2 создано электрическое поле с напряженностью $\vec{E}_0$ (вектор $\vec{E}_0$ лежит в плоскости чертежа) и магнитное поле с индукцией $\vec{B}_0$ (вектор $\vec{B}_0$ направлен перпендикулярно плоскости чертежа к нам). За диафрагмой 3 создано однородное магнитное поле с индукцией $\vec{B}$, причем вектор $\vec{B}$ перпендикулярен плоскости чертежа и направлен от нас.

Диафрагмы 1 и 2 образуют «фильтр скоростей». В самом деле, на ион, движущийся между ними, действуют в противоположных направлениях две силы: электрическая, по модулю равная $F_e = qE_0$, и магнитная, модуль которой равен $F_m = qvB_0$. Через диафрагму 2 пролетят лишь те ионы, для которых эти силы уравновешены, т. е. $F_e = F_m$, или $qE_0 = qvB_0$, откуда $v = E_0/B_0$.

Ионы, движущиеся с другими скоростями, отклонятся либо вправо, либо влево и через фильтр не пройдут.

Ионы, пролетевшие через

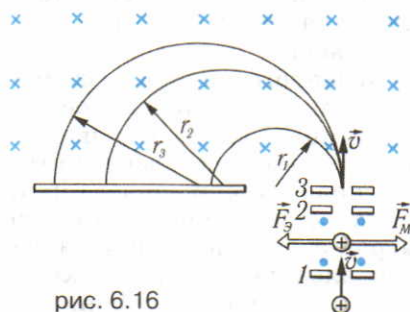


рис. 6.16

диафрагму 3, под действием поперечного магнитного поля описывают полуокружности, радиусы которых равны $r = mv/(qB)$ (см. 55.2). Но так как у всех ионов, прошедших «фильтр скоростей», скорости одинаковы, то радиус полуокружности определяется только удельным зарядом иона q/m . Измерив радиус и зная значения постоянной для данного прибора величины v/B и заряда q определяют массу иона $m = \frac{qBr}{v}$.

Именно с помощью такого и аналогичных масс-спектрометров были определены массы атомов всех элементов, обнаружены изотопы.

■ Вопросы

1. Как определяется модуль силы, действующей со стороны магнитного поля на движущуюся заряженную частицу? 2. По какой траектории движется заряженная частица в однородном магнитном поле? 3. От чего зависит радиус окружности, по которой движется заряженная частица в однородном магнитном поле? 4. От чего зависит период обращения заряженной частицы в однородном магнитном поле? 5. Каков принцип действия циклотрона? 6. Для чего используется магнитное поле в установках для получения высокотемпературной плазмы? 7. Что такое сила Лоренца? 8. Как определить удельный заряд иона? Массу иона?

■ Задачи для самостоятельного решения

55.1. Вычислите радиус окружности, по которой будет двигаться электрон в однородном магнитном поле с индукцией 10^{-4} Тл, если вектор скорости электрона направлен перпендикулярно вектору индукции, а модуль скорости равен 10^6 м/с.

55.2. Как изменится период обращения заряженной частицы в однородном магнитном поле при увеличении магнитной индукции в три раза?

55.3. До какой энергии происходит ускорение протонов в циклотроне, радиус дуантаов которого равен 0,75 м? Индукция магнитного поля равна 1,4 Тл.

§ 56 Магнитное поле в веществе

Ферромагнетики. Электростатическое взаимодействие неподвижных зарядов зависит от свойств среды, в которой они находятся. Опыт показывает, что от свойств среды зависит и магнитное взаимодействие токов. Если около большой катушки подвесить на двух тонких проводах вторую небольшую катушку (рис. 6.17), то при подключении катушек к источнику тока наблюдается отклонение маленькой катушки от вертикального положения. При внесении в большую катушку железного сердечника отклонение малой катушки существенно увеличивается. Увеличение силы Ампера, действующей на малую катушку, показывает, что индукция маг-



рис. 6.17

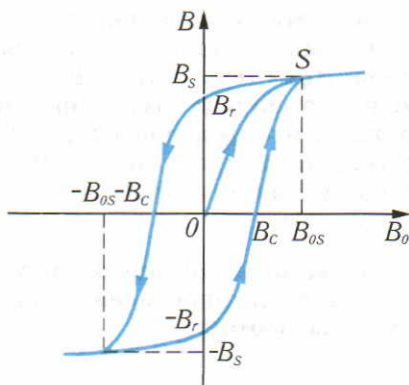


рис. 6.18

нитного поля, создаваемого током в большой катушке, увеличивается при внесении железного сердечника в катушку. Вещества, которые значительно усиливают магнитное поле, называются *ферромагнетиками*. Кроме железа, к ферромагнетикам относятся никель, кобальт и некоторые сплавы.

Магнитная проницаемость. Физическая величина, показывающая, во сколько раз индукция $\vec{B}$ магнитного поля в веществе отличается по модулю от индукции $\vec{B}_0$ магнитного поля в вакууме, называется *магнитной проницаемостью*:

$$\mu = B/B_0.$$

У ферромагнетиков значения магнитной проницаемости достигают нескольких десятков, сотен и даже тысяч единиц. Магнитная проницаемость ферромагнетиков не является постоянной величиной, она зависит от индукции намагничивающего поля B_0 . Кроме того, процесс намагничивания ферромагнетиков зависит от предыдущей истории намагничивания вещества. Это явление называется *гистерезисом*.

На рисунке 6.18 показана так называемая петля гистерезиса. Ее можно получить следующим образом. Изготовим сердечник из размагнитенного ферромагнетика в форме тороида с малой поперечной прорезью и обмотаем его равномерно проводником. Меняя силу тока в обмотке, будем менять индукцию намагничивающего поля B_0 . Индукцию магнитного поля будем измерять в зазоре.

Вначале индукция магнитного поля в ферромагнетике растет вместе с увеличением индукции намагничивающего поля B_0 . Этот рост изображен кривой OS . Дальнейшее возрастание индукции намагничивающего поля ($B_0 > B_{0s}$) не приводит к увеличению индукции поля в ферромагнетике, индукция сохраняет постоянное значение B_s , называемое *намагниченностью насыщения*.

Уменьшая силу тока в обмотке, мы будем уменьшать индукцию намагничивающего поля B_0 и тем самым индукцию поля в ферромагнетике. При этом мы увидим, что индукция поля в сердечнике в процессе его размагничивания остается все время большей, чем в процессе намагничивания. Когда сила тока в обмотке станет равна нулю, исчезнет и намагничивающее поле. Но сердечник сохранит остаточную намагниченность — *остаточную индукцию B_r* .

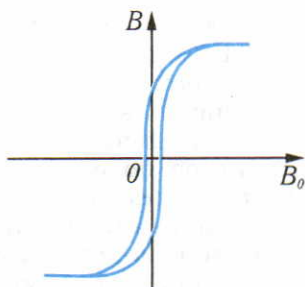


рис. 6.19

Чтобы полностью размагнитить ферромагнитный сердечник, надо через обмотку пропустить ток противоположного направления и тем самым создать магнитное поле с противоположно направленной индукцией ($-B_c$). Значение индукции B_c , при которой сердечник размагничивается, называется *коэрцитивной силой*.

Если далее увеличивать силу тока в обмотке, то процесс намагничивания повторится до насыщения. Затем можно повторить процесс размагничивания, и мы получим на графике замкнутую петлю гистерезиса.

Форма гистерезисной петли и значение коэрцитивной силы определяют область применения тех или иных ферромагнетиков. Материалы с малой коэрцитивной силой называются магнитно-мягкими. Эти материалы используются для изготовления сердечников электромагнитов, трансформаторов, машин постоянного и переменного тока (генераторов, двигателей). На рисунке 6.19 изображена гистерезисная петля магнитно-мягкого материала.

Магнитно-твердыми (или магнитно-жесткими) называются материалы с большим значением коэрцитивной силы, которые трудно размагнитить (см. рис. 6.18). Эти материалы используются для изготовления постоянных магнитов.

Парамагнетики и диамагнетики. Если в опыте по обнаружению магнитного взаимодействия катушек с током в большую катушку (см. рис. 6.17) вносить стержни из меди, алюминия, стекла, фарфора, дерева и т. п., то существенного изменения отклонения маленькой катушки заметить не удастся. Однако эксперименты с применением более чувствительных приборов позволяют установить, что все вещества способны в той или иной мере намагничиваться. По характеру производимых изменений внешнего поля неферромагнитные вещества делятся на парамагнетики и диамагнетики.

Парамагнетиками называют вещества, которые слабо намагничиваются в направлении индукции внешнего поля. Магнитная проницаемость даже наиболее сильных парамаг-

нетиков мало отличается от единицы: 1,00036 у платины и 1,0034 у жидкого кислорода.

Диамагнетиками называются вещества, которые слабо намагничиваются в направлении, противоположном индукции намагничивающего поля, т. е. они ослабляют внешнее магнитное поле. Диамагнитными свойствами обладают, например, серебро, свинец, кварц, большинство газов. Магнитная проницаемость диамагнетиков отличается от единицы не более чем на десятитысячные доли. Самый сильный из диамагнетиков — висмут — обладает магнитной проницаемостью, равной 0,999824.

Природа диа- и парамагнетизма. Электроны в оболочке атомов вещества движутся по различным орбитам. Если для упрощения считать эти орбиты круговыми, то каждый электрон, обращающийся вокруг атомного ядра, можно рассматривать как круговой электрический ток. Каждый электрон как круговой ток создает магнитное поле, которое называется *орбитальным*. Кроме того, у электрона в атоме есть собственное магнитное поле, называемое *спиновым* (от англ. *spin* — вращение, т. е. электрон как бы вращается как волчок).

У атомов одних веществ магнитные поля электронов полностью скомпенсированы. У этих веществ при отсутствии внешнего магнитного поля атомы (и молекулы) не имеют собственного магнитного поля. Эти вещества являются *диамагнетиками*. Под действием внешнего магнитного поля орбитальное движение электронов меняется таким образом, что компенсация орбитальных магнитных полей нарушается. При этом вектор индукции орбитального магнитного поля атома оказывается направленным *против* индукции внешнего поля. Поэтому диамагнетик выталкивается из внешнего магнитного поля.

Диамагнитный эффект присущ всем веществам, но проявиться он может лишь у тех веществ, у которых орбитальные и спиновые магнитные поля атомов скомпенсированы.

У других веществ магнитные поля электронов в атомах скомпенсированы не полностью, и атом в целом оказывается подобным маленькому постоянному магниту. Обычно в веществе все эти маленькие магниты ориентированы произвольно, и суммарная магнитная индукция всех их полей равна нулю (рис. 6.20). Если же поместить вещество в магнитное поле, то все маленькие магниты-атомы повернутся во внешнем магнитном поле подобно стрелкам компаса. Векторы индукции магнитных полей атомов оказываются преимущественно направленными примерно вдоль направления вектора индукции внешнего поля, поэтому магнитное поле в веществе усиливается (рис. 6.21). Этот эффект называется *парамагнитным*. Вещества, в которых этот эффект проявляется, называются *парамагнетиками*.

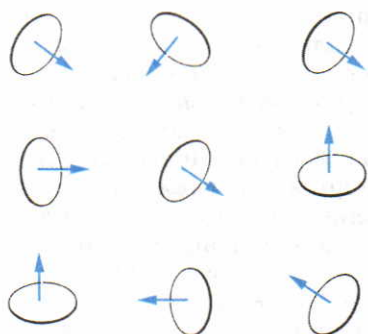


рис. 6.20

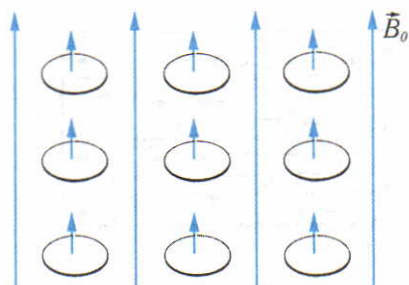


рис. 6.21

Заметим, что полная ориентация магнитных полей атомов возможна только вблизи абсолютного нуля.

Природа ферромагнетизма. Домены. Ферромагнетизм также качественно объясняется магнитными свойствами электронов. Каждый электрон в атоме обладает собственным (спиновым) магнитным полем. Во всех газах, жидкостях и в большинстве кристаллов спиновые магнитные поля взаимно компенсируются благодаря попарной антипараллельной ориентации спинов электронов в атомах, молекулах или кристаллах. Лишь в некоторых кристаллах, например в кристаллах железа, возникают условия для параллельной ориентации векторов индукции спиновых магнитных полей части электронов и их сложения. В результате этого внутри кристалла ферромагнетика возникают намагниченные области протяженностью $10^{-2} - 10^{-4}$ см. Эти области самопроизвольно намагничивания называют *доменами* (рис. 6.22).

В разных доменах индукции магнитных полей имеют различные направления, и в большом кристалле поля взаимно компенсируют друг друга. При внесении ферромагнитного образца во внешнее магнитное поле происходит смещение границ отдельных доменов так, что объем доменов, ориентированных по внешнему полю, увеличивается. Поэтому с увеличением индукции внешнего поля B_0 возрастает магнитная индукция намагниченного вещества.

При значениях индукции внешнего поля $B_0 \geq B_{0s}$ смещение границ доменов достигает максимально возможного значения, так как все домены оказываются ориентированными вдоль индукции внешнего поля (рис. 6.23). Поэтому возрастание магнитной индукции B с увеличением магнитной индукции B_0 внешнего поля пре-

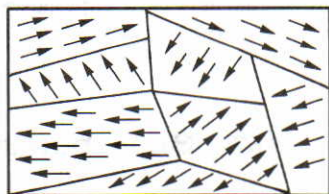


рис. 6.22

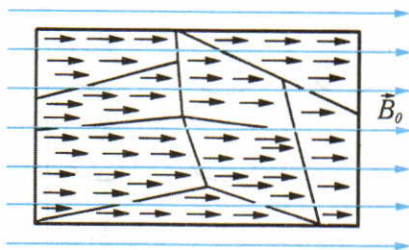


рис. 6.23

кращается (см. рис. 6.18). Это явление называется *магнитным насыщением*.

Постоянные магниты. При вынесении ферромагнитного образца из внешнего магнитного поля значительная часть доменов сохраняет упорядоченную ориентацию. Магнитно-твердый образец становится *постоянным магнитом*.

Для изготовления постоянных магнитов используются специальные стали, сплавы железа с алюминием, никелем и кобальтом, оксиды железа и некоторых других металлов.

Температура Кюри. Упорядоченная ориентация магнитных полей атомов в доменах ферромагнетика может быть нарушена за счет энергии тепловых колебаний атомов в кристалле. Чем выше температура кристалла, тем быстрее разрушается порядок в ориентации доменов и образец размагничивается. Температура, выше которой вещество теряет ферромагнитные свойства и становится парамагнетиком, называется *температурой* (или точкой) *Кюри*. Температура Кюри у железа 770°C , у кобальта 1130°C , у никеля 356°C .

Исчезновение ферромагнитных свойств при высокой температуре можно наблюдать в опыте с лезвием бритвы. При комнатной температуре оно притягивается к магниту; при нагревании в пламени отпадает от магнита, т. е. ферромагнитные свойства стального лезвия теряются.

После охлаждения образца его ферромагнитные свойства восстанавливаются, однако магнитно-твердый материал может стать магнитно-мягким. Дело в том, что в процессе отжига меняется структура кристаллической решетки, изменяются упругие, магнитные и другие свойства вещества.

■ Вопросы

1. Какие вещества называются ферромагнетиками? 2. Как объясняются процессы намагничивания и размагничивания ферромагнитных материалов? 3. Что такое температура Кюри? 4. Какими магнитными свойствами обладают диамагнетики и парамагнетики? 5. Из каких магнитных материалов следует изготавливать сердечники трансформаторов — магнитно-мягких или магнитно-твердых?

§ 57

Электроизмерительные приборы

В электроизмерительных приборах *магнитоэлектрической* системы используется действие магнитного поля на проводник с током (рис. 6.24). Измеряемый электрический ток

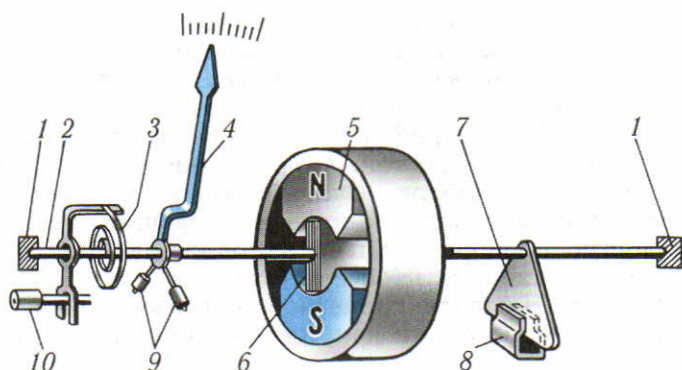


рис. 6.24

пропускается через рамку 6, помещенную в магнитное поле постоянного магнита 5. Рамка укреплена на оси 2, для уменьшения силы трения стальная ось 2 опирается на подпятники 1, изготовленные из синтетического агата, рубина или корунда.

Измеряемый ток подводится к рамке 6 через спиральную пружину 3. На участки проводников, расположенные перпендикулярно линиям индукции магнитного поля, действует сила Ампера. Если бы подвижная часть измерительного механизма не имела пружины 3, противодействующую ее повороту, то при пропускании тока через рамку происходил бы поворот ее на 180° независимо от силы тока. Но силы упругости, возникающие при закручивании пружины, препятствуют повороту рамки. Сила упругости прямо пропорциональна углу закручивания пружины, поэтому угол поворота, при котором наступает равенство моментов сил Ампера и сил упругости, пропорционален силе тока в рамке. Шкала магнитоэлектрического прибора равномерная.

При изменении силы тока равновесие моментов сил упругости и сил Ампера нарушается, в результате подвижная система начинает совершать колебания относительно нового положения равновесия. Вместе с ней колеблется и стрелка прибора. Для устранения этих колебаний в приборах применяются специальные успокоители. В них для торможения подвижной системы используется тонкая алюминиевая пластина 7, помещенная между полюсами постоянного магнита 8 и закрепленная на оси вращения подвижной системы. При повороте подвижной системы алюминиевая пластина успокоителя движется в поле постоянного магнита. Наводимые в ней при этом индукционные токи тормозят движение пластины и вместе с тем вращение всей подвижной системы электроизмерительного прибора.

Для того чтобы при любом положении указательной стрелки 4 подвижная часть была уравновешена в поле тяжести, имеются противовесы 9. Установка на нулевое деление шкалы производится с помощью корректора 10.

Поворот стрелки в приборах магнитоэлектрической системы пропорционален силе тока, протекающего через измерительную систему прибора. Однако шкала прибора может быть отградуирована и в единицах напряжения, так как сила тока прямо пропорциональна напряжению, приложенному к выводам измерительной системы.

Приборы магнитоэлектрической системы применяются для измерения силы тока и напряжения в цепях постоянного тока.

В электроизмерительных приборах других систем подвижная часть обычно устроена примерно так же, как и в приборах магнитоэлектрической системы.

В приборах *электродинамической* системы нет постоянного магнита. Поворот подвижной системы происходит в результате электродинамического взаимодействия электрических токов в двух катушках. Одна катушка закреплена неподвижно, а другая укреплена на оси подвижной системы (рис. 6.25).

Электродинамические приборы могут служить *ваттметрами* — приборами для измерения мощности. С этой целью неподвижную (токовую) катушку включают в цепь последовательно, а подвижную (катушку напряжения) через дополнительный резистор включают параллельно потребителю энергии. Вращающий момент, действующий на подвижную рамку, пропорционален произведению сил токов в обеих обмотках. Но сила тока в одной обмотке равна силе тока в рабочей цепи, а сила тока в другой пропорциональна напряжению на рабочем участке цепи. Очевидно, что их произведение пропорционально мощности.

В приборах *электромагнитной* системы измеряемый ток пропускается по неподвижной катушке, а поворот подвижной

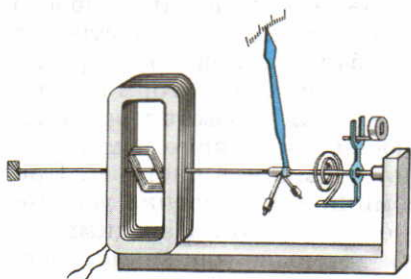


рис. 6.25

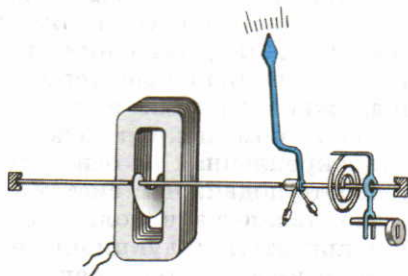


рис. 6.26

системы вызывается втягиванием в эту катушку стального сердечника, связанного с подвижной системой (рис. 6.26).

В приборах *электростатической* системы вращение подвижной системы вызывается силами электростатического взаимодействия разноименно заряженных проводников. Достоинство этих приборов заключается в том, что они не потребляют тока, т. е. не являются дополнительной нагрузкой, как приборы другой системы. Но они позволяют измерять только напряжение, но не силу тока.

Условные обозначения, позволяющие определить систему электроизмерительного прибора и его назначение, приведены в таблице 5.

Таблица 5

Измеряемая величина	Сила тока	A
	Напряжение	V
	Электрическое сопротивление	Ω
	Мощность	W
Система прибора	Магнитоэлектрическая	
	Электромагнитная	
	Электродинамическая	
	Электростатическая	
Измеряемый ток	Постоянный	—
	Переменный	~
	Постоянный и переменный	$\approx$
Положение прибора при измерении	Вертикальное	$\perp$
	Горизонтальное	—
	Под углом 60°	$\angle 60^\circ$

Погрешность прибора. Одной из важнейших характеристик электроизмерительных приборов является класс точности. Отношение максимально возможного значения абсолютной погрешности ΔA к максимальному значению измеряемой величины $A_{\max}$, выраженное в процентах, называется *приведенной* погрешностью прибора:

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{\Delta A}{A_{\max}} 100\%.$$

При отклонении стрелки на всю шкалу граница относительной погрешности прибора равна приведенной погрешности. При измерении меньших значений измеряемой величины относительная погрешность измерения превышает приведенную погрешность прибора.

По приведенной погрешности электроизмерительные приборы делятся на восемь классов точности: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0.

■ Вопросы

1. Как устроен электроизмерительный прибор магнитоэлектрической системы? 2. Почему приборы магнитоэлектрической системы пригодны для измерений только в цепях постоянного тока? 3. Для чего в электроизмерительных приборах нужны успокоители? 4. Как устроен измерительный прибор электродинамической системы?

§ 58 Электрический двигатель постоянного тока

В электрических двигателях для преобразования электрической энергии в механическую используется действие силы Ампера.

Основными частями электродвигателя постоянного тока (рис. 6.27) являются индуктор 4, с помощью которого создается постоянное магнитное поле, якорь 3, через обмотки которого пропускается ток, и коллектор 1 с электрическими щетками 2, с помощью которых осуществляется соединение обмоток якоря с источником тока.

В простейшей машине постоянного тока индуктор — это постоянный магнит или электромагнит со стальным сердечником. Обмотки электромагнита индуктора называются обмотками возбуждения. Магнит индуктора имеет полюсные наконечники

такой формы, что между ними образуется отверстие цилиндрической формы. Между полюсными наконечниками индуктора помещается якорь. Якорь состоит из сердечника — стального цилиндра с пазами, параллельными оси цилиндра, и обмоток, вложенных в пазы сердечника. Выводы каждой обмотки соединены с медными контактами коллектора.

Якорь насажен на ось, концы которой установлены в подшипниках, и может свободно вращаться вокруг этой оси.

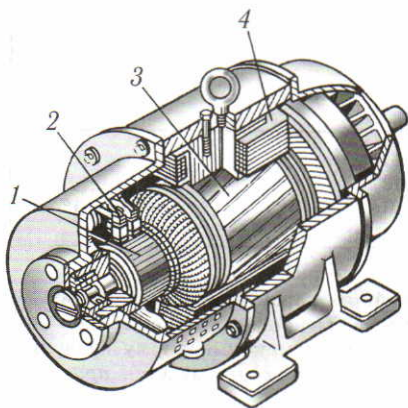


рис. 6.27

К коллектору с двух противоположных сторон прижимаются щетки из графита или меди; щетки подключаются к источнику постоянного напряжения. При подключении напряжения в обмотке якоря протекает постоянный электрический ток и на провода обмотки со стороны магнитного поля действует сила Ампера.

В проводах обмотки, расположенных на противоположных сторонах якоря, направления сил Ампера противоположны друг другу, и под действием этих сил якорь приходит во вращение. При вращении якоря с помощью коллектора происходит отключение от щеток одной обмотки и подключение другой обмотки таким образом, что в каждый момент времени ток пропускается через ту обмотку якоря, в плоскости которой лежит вектор индукции магнитного поля индуктора. Сила Ампера, действующая на провода обмотки, в этом случае максимальна.

Основной рабочей характеристикой электродвигателя постоянного тока является вращающий момент, создаваемый на валу двигателя силой Ампера, действующей на проводник с током в обмотке якоря. Момент пары сил, действующий на рамку с током, равен:

$$M = 2FrN,$$

где r — радиус ротора; N — число витков в обмотке.

Из выражения (53.1) получаем

$$M = 2IBlrN, \quad (58.1)$$

где I — сила тока в обмотке; B — индукция магнитного поля; l — длина проводника.

Так как $2lr = S$ есть площадь рамки, а $BS = \Phi$ — максимальный магнитный поток через рамку, то вращающий момент на валу двигателя равен:

$$M = NI\Phi. \quad (58.2)$$

Мы получили, что вращающий момент двигателя постоянного тока прямо пропорционален максимальному магнитному потоку Φ через виток обмотки, силе тока I в обмотке якоря и числу витков N в обмотке.

Скорость вращения якоря электродвигателя можно регулировать, изменяя силу тока в его обмотках; направление вращения можно изменять, изменяя направление тока в обмотке якоря или индуктора.

Электродвигатель постоянного тока может приводить в движение колеса электровоза, троллейбуса, трамвая, приводить в действие электрооборудование, магнитофон и другие бытовые электроприборы.

С помощью электродвигателя постоянного тока — старте-

ра — производится запуск двигателя автомобиля. В качестве примера приведем некоторые технические характеристики стартера автомобиля «Жигули». Рабочее напряжение стартера 12 В, сила тока в обмотке якоря при максимальной мощности 260 А, частота вращения якоря 30 об/с.

■ Вопросы

1. Каково устройство электродвигателя постоянного тока? 2. Каково назначение индуктора? 3. Как устроен якорь? 4. Каково назначение коллектора и щеток? 5. От чего зависит вращающий момент электродвигателя постоянного тока? 6. Как можно изменить направление вращения якоря электродвигателя? 7. Как можно изменять скорость вращения якоря электродвигателя?

■ Задачи для самостоятельного решения

58.1. Для подъема грузов на валу электромотора постоянного тока укреплен барабан радиусом 10 см, на который наматывается трос. Определите максимальную массу груза, который можно поднять таким способом, если радиус якоря 5 см, длина участка обмотки, расположенного перпендикулярно вектору индукции, равна 15 см, число витков в обмотке 20, индукция магнитного поля 1,2 Тл, а максимальная сила тока в обмотке 20 А.

58.2. Двигатель потребляет из сети мощность 2 кВт. Максимальный магнитный поток через обмотку равен $1,1 \cdot 10^{-2}$ Вб, частота вращения 40 об/с. Сила тока в обмотке равна 20 А, число витков в обмотке равно 30. Определите коэффициент полезного действия двигателя.



ГЛАВА 7

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

§ 59

Закон электромагнитной индукции

Индукционный ток. Электрические и магнитные поля порождаются одними и теми же источниками — электрическими зарядами. Поэтому можно было предположить, что между этими полями существует определенная связь. Это предположение нашло экспериментальное подтверждение в 1831 г. в опытах выдающегося английского физика М. Фарадея, в которых он открыл явление электромагнитной индукции.

Проведем опыты, подобные тем, которые выполнил Фарадей. Возьмем две катушки из медной проволоки и первую подключим к источнику постоянного тока, а вторую расположим над первой таким образом, чтобы магнитный поток, создаваемый электрическим током в первой катушке, пронизывал витки второй катушки. Подключив выводы второй катушки к чувствительному гальванометру, убедимся, что

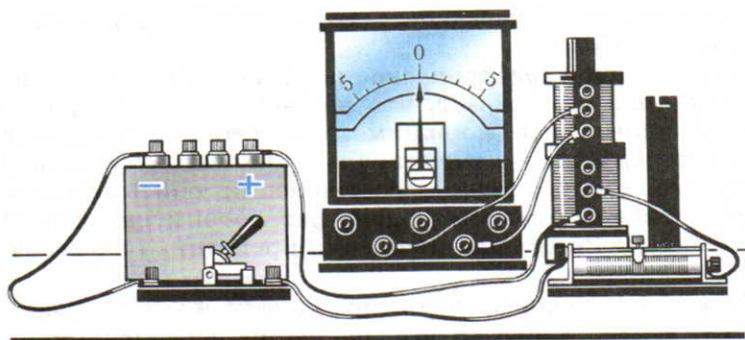


рис. 7.1

магнитный поток, пронизывающий вторую катушку, не создает в ней электрического тока (рис. 7.1).

Отключим первую катушку от источника тока. Опыт показывает, что при этом через вторую катушку и гальванометр в течение короткого промежутка времени протекает электрический ток. При замыкании цепи первой катушки ключом мы увидим, что во второй катушке снова протекает кратковременный электрический ток, но его направление противоположно направлению тока в первом опыте.

Не отключая первой катушки от источника тока, изменим взаимное расположение катушек. Гальванометр обнаруживает возникновение электрического тока во второй катушке при всяком ее перемещении, сопровождающемся изменением магнитного потока через нее. Ток во второй катушке возникает и при перемещении относительно нее постоянного магнита (рис. 7.2).

При включении или выключении тока в первой катушке электрический ток во второй катушке возникает не всегда. Например, если плоскость, в которой лежат витки второй катушки, расположена параллельно вектору индукции магнитного поля, создаваемого первой катушкой, то электрический ток во второй катушке не возникает. В этом случае, хотя и происходит изменение магнитного потока в первой катушке, магнитный поток через вторую катушку все время равен нулю.

Электрический ток, возникающий в замкнутом контуре при изменениях магнит-

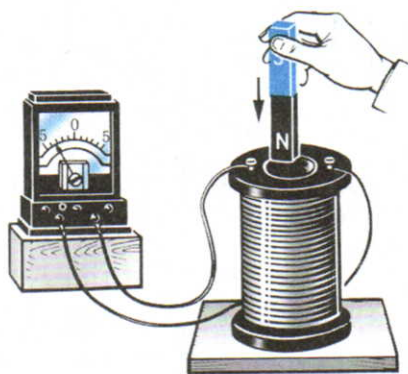


рис. 7.2

ного потока, пронизывающего этот контур, называется *индукционным током*.

Индукционное электрическое поле. Возникновение индукционного тока показывает, что на свободные электрические заряды в проводнике, по-видимому, действует электрическое поле. Его называют *индукционным электрическим полем*. Для вывода количественных соотношений, описывающих явления, связанные с этим полем, рассмотрим сначала явления, наблюдающиеся при движении проводника в магнитном поле.

Пусть в однородном магнитном поле движется проводник так, что вектор скорости его движения $\vec{v}$ перпендикулярен вектору магнитной индукции $\vec{B}$. На свободные электроны и положительные ионы, из которых состоит металлический проводник, действуют со стороны магнитного поля силы, направленные в противоположные стороны (рис. 7.3). Свободные электроны приходят в движение. Это приводит к разделению электрических зарядов в проводнике и возникновению внутри проводника электрического поля, создаваемого зарядами, накапливающимися на торцах проводника.

Движение электронов в проводнике прекращается тогда, когда сила $\vec{F}_э$, действующая на электрон со стороны этого электрического поля, становится равной по модулю силе $\vec{F}_м$, действующей на него со стороны магнитного поля (рис. 7.4).

Так как $F_э = eE_{кул}$, где $E_{кул}$ — модуль напряженности кулоновского электрического поля, возникшего в проводнике в результате разделения зарядов, а $F_м = evB$, то условие равенства сил, действующих на электрон со стороны электрического и магнитного полей, запишется так:

$$eE_{кул} = evB,$$

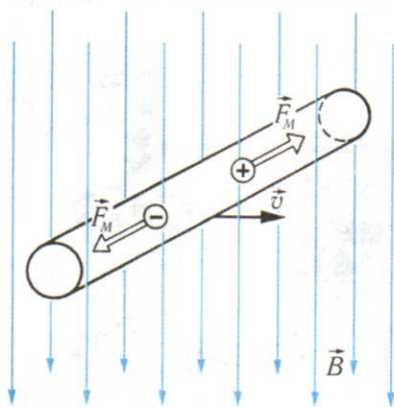


рис. 7.3

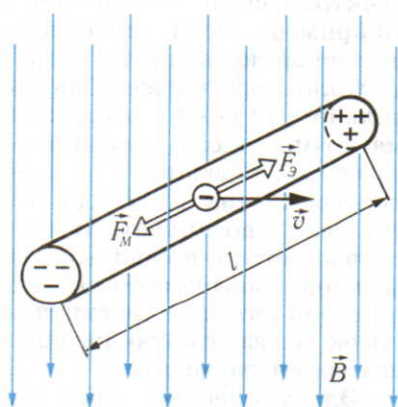


рис. 7.4

откуда

$$E_{\text{кул}} = vB. \quad (59.1)$$

Если проводник прямолинейный и его длина равна l , то по напряженности $\vec{E}_{\text{кул}}$ электрического поля внутри него можно определить напряжение U на концах проводника:

$$U = E_{\text{кул}} l = vBl. \quad (59.2)$$

Возникновение электрического тока в проводнике, движущемся относительно магнитного поля, объясняется уже известными физическими законами. Но достаточно мысленно перейти при наблюдении того же самого физического явления в инерциальную систему отсчета, связанную с проводником, чтобы убедиться в том, что это явление — принципиально новое. В системе отсчета, связанной с равномерно движущимся проводником, наблюдаемое возникновение электрического тока и разделение зарядов нельзя объяснить действием магнитных сил — ведь они на неподвижные заряды не действуют!

Конечно, физический факт разделения электрических зарядов в проводнике и возникновения напряжения на его концах не зависит от выбора системы отсчета. В системе отсчета, связанной с проводником, электрические заряды неподвижны и магнитные силы на них не действуют. Факт разделения зарядов в этом случае можно объяснить, если допустить, что в этой системе отсчета возникает индукционное электрическое поле напряженностью $\vec{E}_{\text{инд}}$, равной по модулю $\vec{E}_{\text{кул}}$, но направленной в противоположную сторону:

$$\vec{E}_{\text{инд}} = -\vec{E}_{\text{кул}}. \quad (59.3)$$

Электромагнитное поле. Рассмотрев движение проводника в магнитном поле, мы пришли к следующему выводу: в системе отсчета, связанной с постоянным магнитным полем, нет индукционного электрического поля; в системе же отсчета, связанной с движущимся проводником, существует индукционное электрическое поле. Следовательно, величины, описывающие электрические и магнитные поля, зависят от выбора системы отсчета.

Эта особенность электрического и магнитного полей объясняется следующим образом. Как показал Дж. Максвелл, исторически сложившиеся в физике представления об электрических и магнитных полях как самостоятельных сущностях не соответствуют истине. В действительности существует только одно поле — *электромагнитное поле* как особая форма материи. Это единое электромагнитное поле мы описываем в различных системах отсчета по-разному. В частности,

возникновение индукционного тока мы описываем в системе отсчета, связанной с движущимся в магнитном поле проводником, как действие индукционного электрического поля, а в системе отсчета, связанной с неподвижными источниками постоянного магнитного поля (катушками, постоянными магнитами), — как действие этого магнитного поля на движущиеся заряды, т. е. магнитных сил.

Электромагнитное поле никогда не исчезает при переходе из одной инерциальной системы в другую, но его характеристики меняются. В соответствии с исторически сложившейся традицией действие электромагнитного поля на электрический заряд представляют как результат действия двух полей — электрического и магнитного:

$$\vec{F}_\text{л} = \vec{F}_\text{э} + \vec{F}_\text{м}. \quad (59.4)$$

Сила $\vec{F}_\text{л}$, с которой электромагнитное поле действует на электрический заряд, называется *силой Лоренца* (см. § 55). При переходе из одной инерциальной системы отсчета в другую могут изменяться обе составляющие силы Лоренца — электрическая $\vec{F}_\text{э}$ и магнитная $\vec{F}_\text{м}$, иногда одна из них может обратиться в нуль, однако физические явления будут протекать одинаково при одних и тех же начальных условиях (принцип относительности).

Закон электромагнитной индукции. Для установления количественных закономерностей, описывающих процесс возникновения индукционного тока, продолжим рассмотрение явлений, происходящих при движении проводника в магнитном поле. Пусть прямолинейный проводник длиной l движется вдоль «рельсов» в однородном магнитном поле перпендикулярно вектору магнитной индукции $\vec{B}$ с постоянной скоростью $\vec{v}$ относительно магнитного поля. На свободные

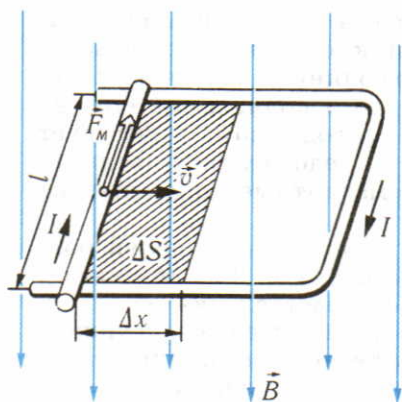


рис. 7.5

электроны в движущемся проводнике действуют магнитные силы, играющие в этом случае роль сторонних сил, которые и служат причиной возникновения индукционного электрического тока в контуре, образуемом движущимся проводником и неподвижными «рельсами», по которым он скользит (рис. 7.5).

ЭДС индукции в контуре равна:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_\text{инд} &= A_\text{стор}/q = \\ &= F_\text{стор} l / q = E_\text{инд} l. \end{aligned} \quad (59.5)$$

Подставив значение $E_{\text{инд}} = -vB$ в (59.5), получим выражение для ЭДС индукции:

$$\mathcal{E}_{\text{инд}} = -vBl. \quad (59.6)$$

Индукционный ток вызывает нагревание проводников в контуре. Это означает, что работа по перемещению электрических зарядов в индукционном электрическом поле по замкнутому пути не равна нулю. Следовательно, индукционное электрическое поле не является потенциальным. Такие поля называют вихревыми.

Во внешнем участке контура движение электрических зарядов происходит под действием кулоновского поля электрических зарядов, разделенных сторонней силой — силой Лоренца.

Умножив и разделив правую часть уравнения (59.6) на малый промежуток времени Δt , получим

$$\mathcal{E}_{\text{инд}} = -vBl = \frac{-v\Delta t Bl}{\Delta t} = \frac{-\Delta x l B}{\Delta t} = \frac{-B\Delta S}{\Delta t}. \quad (59.7)$$

Здесь ΔS — изменение площади контура, пронизываемого магнитным полем. В случае перпендикулярности вектора магнитной индукции плоскости контура произведение изменения площади контура ΔS на модуль вектора магнитной индукции равно модулю изменения магнитного потока через контур:

$$B\Delta S = \Delta\Phi. \quad (59.8)$$

Подставив формулу (59.8) в формулу (59.7), получаем

$$\mathcal{E}_{\text{инд}} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (59.9)$$

ЭДС индукции в контуре равна отношению изменения магнитного потока через контур к малому промежутку времени, за который произошло это изменение, взятому с противоположным знаком.

Полученный результат справедлив для частного случая равномерного движения проводника в однородном магнитном поле. В общем случае для нахождения ЭДС индукции в контуре в любой момент времени нужно найти предел отношения (59.9) при условии неограниченного уменьшения промежутка времени ($\Delta t \rightarrow 0$). При известной зависимости от времени магнитного потока через контур предел этого отношения определяется как производная от магнитного потока по времени:

$$\mathcal{E}_{\text{инд}} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left(-\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right) = -\Phi'(t). \quad (59.10)$$

Выражения (59.9) и (59.10) для ЭДС индукции получены для случая изменения магнитного потока через контур в ре-

зультате движения проводника в магнитном поле. Однако опыты показали, что они применимы для определения ЭДС индукции и во всех других случаях, при любом изменении магнитного поля. Таким образом, ЭДС индукции в контуре равна скорости изменения во времени магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром, взятой с противоположным знаком. Этот закон природы, открытый М. Фарадеем, называют *законом электромагнитной индукции* или *законом Фарадея*.

ЭДС индукции в катушке. Если в последовательно соединенных контурах происходят одинаковые изменения магнитного потока, то ЭДС индукции в них равна сумме ЭДС индукции в каждом из контуров. Поэтому при изменении магнитного потока в катушке, состоящей из N одинаковых витков провода, возникает ЭДС индукции, в N раз большая, чем в одиночном контуре:

$$\mathcal{E} = -N\Phi'(t). \quad (59.11)$$

■ Вопросы

1. Что происходит со свободными электрическими зарядами в проводнике, движущемся в магнитном поле? 2. При каком условии прекращается движение свободных электрических зарядов внутри проводника, который движется в магнитном поле? 3. Какая причина вызывает разделение электрических зарядов в неподвижном проводнике, который находится в изменяющемся магнитном поле? 4. В чем отличие индукционного электрического поля от электростатического? 5. При каких условиях в замкнутом контуре возникает индукционный ток?

■ ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Задача. Рассчитайте установившуюся скорость падения перемычки вдоль проводочного каркаса в магнитном поле, линии индукции которого горизонтальны и перпендикулярны плоскости каркаса. Длина перемычки l , ее масса m , электрическое сопротивление R . Модуль индукции магнитного поля равен B .

Решение. При падении перемычки изменяется площадь проводочного контура, следовательно, изменяется пронизывающий его магнитный поток. При этом в контуре возникает ЭДС индукции, модуль которой можно найти, используя закон электромагнитной индукции (59.6):

$$\mathcal{E} = Blv.$$

В металлической перемычке под действием ЭДС индукции возникает ток. Сила тока определяется по закону Ома:

$$I = \mathcal{E}/R = Blv/R.$$

По мере увеличения скорости перемычки сила тока возрастает,

следовательно, увеличивается сила Ампера, действующая на перемычку и тормозящая ее движение:

$$F_{\text{м}} = IBl = B^2 l^2 v / R.$$

При достижении равенства силы тяжести, действующей на перемычку, и силы Ампера перемычка начинает двигаться с постоянной скоростью, которую легко определить из этого условия: $mg = F_{\text{м}}$, или $mg = B^2 l^2 v / R$, откуда следует:

$$v = mgR / (Bl)^2.$$

■ Задачи для самостоятельного решения

59.1. Определите ЭДС индукции в контуре при равномерном уменьшении магнитного потока на $4 \cdot 10^{-4}$ Вб за 0,2 с.

59.2. Сколько витков должна иметь катушка для того, чтобы при равномерном возрастании магнитного потока через каждый ее виток от нуля до $2 \cdot 10^{-2}$ Вб за $5 \cdot 10^{-3}$ с на ее концах возникало напряжение 220 В?

59.3. Какое напряжение возникает между концами крыльев самолета при его движении в магнитном поле Земли, если расстояние между концами крыльев самолета 43 м, а скорость полета 900 км/ч? Модуль вертикальной составляющей вектора магнитной индукции принять равным $2 \cdot 10^{-5}$ Тл.

§ 60 Правило Ленца

Правило Ленца. При рассмотрении явления электромагнитной индукции мы не обращали особого внимания на направление индукционного тока в контуре. Остановимся теперь на этом вопросе. Опыт показывает, что направление индукционного тока в контуре зависит от того, возрастает или убывает магнитный поток, пронизывающий контур. Наиболее общее правило, позволяющее определить направление индукционного тока в контуре, было установлено в 1833 г. Э. Х. Ленцем.

Правило Ленца можно наглядно показать с помощью легкого алюминиевого кольца. При вдвигании постоянного магнита сплошное кольцо отталкивается от него (рис. 7.6), а при выдвигании притягивается к магниту. Результат опытов не зависит от полярности магнита. Если же вдвигать (или выдвигать) магнит в кольцо с прорезью, то кольцо остается неподвижным, так как в нем не возникает индукционный ток.

Отталкивание и притяжение сплошного кольца объясняется возникновением в нем

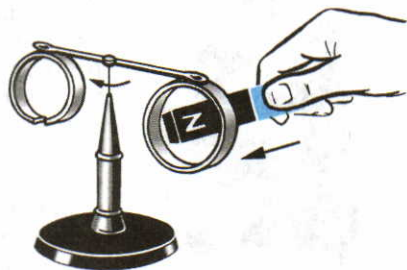


рис. 7.6

индукционного тока при изменениях магнитного потока через это кольцо и действием магнитного поля на индукционный ток. При вдвигании магнита магнитный поток через кольцо возрастает; отталкивание кольца при этом показывает, что индукционный ток в нем имеет такое направление, что вектор индукции его магнитного поля противоположен по направлению вектору индукции внешнего магнитного поля. Этим вызвано отталкивание кольца от магнита. При уменьшении магнитного потока через контур (выдвижение магнита) индукционный ток в нем имеет такое направление, что вектор индукции его магнитного поля совпадает по направлению с вектором индукции внешнего магнитного поля, и этим объясняется притяжение кольца к магниту.

Обобщение результатов опытов приводит к следующему выводу: индукционный ток имеет всегда такое направление, что его магнитное поле препятствует любым изменениям магнитного потока, вызывающим появление индукционного тока. Это и есть *правило Ленца*.

Эта особенность явления электромагнитной индукции выражена математически знаком «минус» в формуле, устанавливающей связь ЭДС индукции со скоростью изменения магнитного потока через контур [см. формулу (59.9)].

Правило Ленца является следствием закона сохранения энергии в электромагнитных процессах. Энергия индуцированного электрического тока в контуре может идти на нагревание проводников, превращаться в механическую энергию движущихся механизмов и сопровождаться другими превращениями энергии. Эта энергия не может возникнуть сама со-

бой, а может появиться лишь за счет других видов энергии, а именно — за счет работы внешних сил против сил Ампера, возникающих при возбуждении индукционного тока в контуре.

Индукционный ток в сплошных проводниках. В соответствии с законом электромагнитной индукции любые изменения магнитного потока, пронизывающего проводящее тело, сопровождаются возникновением в нем индукционных токов. Индукционные токи в сплошных проводящих телах (они называются токами Фуко) можно обнаружить на опыте с маятником (пластиной), колеблющимся в зоре электромагнита (рис. 7.7). До включения тока маятник колеблется длительное время без существенного уменьшения размаха колебаний. При пропус-

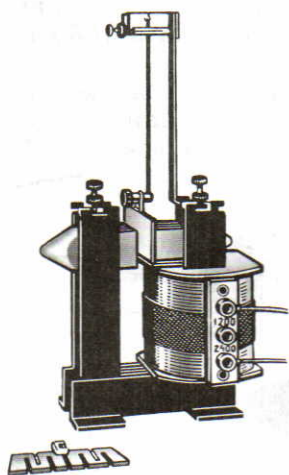


рис. 7.7

кании тока через катушку электромагнита маятник быстро останавливается. Торможение маятника объясняется действием магнитного поля на индукционные токи, возникающие в пластине при ее движении в магнитном поле. Если же взять пластину с разрезами, то ее колебания долго не затухают.

Тормозящее действие индукционных токов используется для успокоения колебаний стрелок электроизмерительных приборов.

■ Вопросы

1. Как объяснить результаты опытов с легким алюминиевым кольцом и движущимся магнитом? 2. Как формулируется правило Ленца? 3. Какова связь правила Ленца с законом сохранения энергии? 4. Почему колебания металлической сплошной пластины между полюсами электромагнита быстро затухают? 5. Почему колебания пластины с разрезами затухают медленнее, чем колебания сплошной пластины? 6. Почему якорь двигателя постоянно-го тока набирают из тонких стальных пластин, изолированных друг от друга, а не отливают в виде сплошной болванки, что было бы проще?

§ 61 Самоиндукция

Индуктивность. Электрический ток, проходящий по проводнику, создает вокруг него магнитное поле. Магнитный поток через контур этого проводника пропорционален индукции магнитного поля внутри контура, а индукция магнитного поля пропорциональна силе тока в проводнике. Следовательно, магнитный поток через контур прямо пропорционален силе тока в контуре:

$$\Phi = LI. \quad (61.1)$$

Физическая величина, равная отношению магнитного потока через контур к силе тока в контуре, называется *индуктивностью* этого контура:

$$L = \Phi/I. \quad (61.2)$$

Единица индуктивности. За единицу индуктивности в СИ принимается генри (Гн). Индуктивность контура равна 1 Гн, если при силе постоянного тока 1 А магнитный поток через контур равен 1 Вб:

$$1 \text{ Гн} = 1 \text{ Вб} / 1 \text{ А}.$$

Индуктивность катушки. Найдем индуктивность длинной цилиндрической катушки. Пусть длина катушки l , радиус одного витка $r \ll l$, число витков N и сила тока в обмотке I . Если в катушке нет сердечника, то индукция магнитного поля $B_0 = \mu_0 NI/l$ (см. 54.9); при наличии сердечника $B = \mu \mu_0 NI/l$, где μ — магнитная проницаемость вещества, из которого из-

готовлен сердечник (при условии, что вещество полностью заполняет пространство внутри катушки).

Магнитный поток, создаваемый током через один виток, равен $\Phi_1 = BS$, поток, создаваемый током через N витков, равен $\Phi = NBS$, где $S = \pi r^2$ — площадь поперечного сечения катушки. Подставив значение магнитной индукции, получим

$$\Phi = \mu \mu_0 N^2 IS / l. \quad (61.3)$$

Отсюда для индуктивности катушки имеем

$$L = \mu \mu_0 N^2 S / l = \mu \mu_0 n^2 S l, \quad (61.4)$$

где $n = N/l$ — число витков на единицу длины катушки.

Самоиндукция. При изменении силы тока в катушке происходит изменение магнитного потока, создаваемого этим током. Изменение магнитного потока, пронизывающего катушку, в свою очередь, сопровождается появлением ЭДС индукции в катушке. Явление возникновения ЭДС индукции в электрической цепи в результате изменения силы тока в этой же цепи называется *самоиндукцией*.

В соответствии с правилом Ленца ЭДС самоиндукции препятствует нарастанию силы тока при включении цепи и убыванию силы тока в ней при выключении.

Явление самоиндукции можно наблюдать, собрав электрическую цепь из катушки с большой индуктивностью, переменного резистора, двух одинаковых ламп накаливания и источника тока (рис. 7.8). Резистор должен иметь такое же электрическое сопротивление, что и обмотка катушки. Опыт показывает, что при замыкании цепи электрическая лампа, включенная последовательно с катушкой, загорается несколько позже, чем лампа, включенная последовательно с резистором. Нарастанию тока при замыкании цепи препятствует ЭДС самоиндукции, возникающая при возрастании магнитного потока. При отключении источника тока гаснут обе лампы, но с некоторым запаздыванием. В этом случае ток в цепи поддерживается за счет ЭДС самоиндукции, возникающей при убывании магнитного потока в катушке.

ЭДС самоиндукции. ЭДС самоиндукции $\mathcal{E}_L$, возникающая в катушке с индуктивностью L , по закону электромагнитной индукции равна:

$$\mathcal{E}_L = -\Phi'(t) = -(LI(t))' = -L I'(t). \quad (61.5)$$

ЭДС самоиндукции прямо пропорциональна индуктивности катушки и скорости изменения силы тока в ее обмотке.

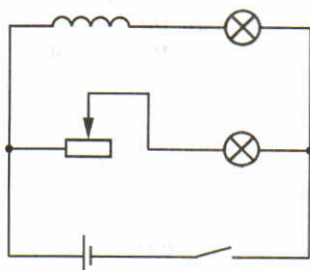


рис. 7.8

Используя выражение (61.5), можно дать второе определение единицы индуктивности: элемент электрической цепи обладает индуктивностью в 1 Гн, если при равномерном изменении силы тока в цепи со скоростью 1 А за 1 с в нем возникает ЭДС самоиндукции 1 В.

■ Вопросы

1. Что называется индуктивностью? 2. Как определяется единица индуктивности? 3. Что такое самоиндукция? 4. В каких опытах обнаруживается явление самоиндукции? 5. От чего зависит ЭДС самоиндукции?

■ Задачи для самостоятельного решения

61.1. Какой индуктивностью обладает контур, если при силе тока 20 А магнитный поток в контуре равен 10^{-2} Вб?

61.2. Какое напряжение возникает между концами катушки с индуктивностью 1 Гн при равномерном убывании силы тока в ней от 1 до 0 А за 10^{-3} с?

61.3. Вычислите индуктивность цилиндрической катушки, имеющей 1000 витков, длину 50 см и диаметр витка 10 см.

§ 62 Энергия электромагнитного поля

Энергия магнитного поля катушки с током. Если включить электрическую лампу параллельно катушке в электрическую цепь постоянного тока, то при размыкании ключа наблюдается кратковременная вспышка лампы. Ток в цепи возникает под действием ЭДС самоиндукции. Источником энергии, выделяющейся при этом в электрической цепи, является магнитное поле катушки.

Энергию магнитного поля катушки можно вычислить следующим способом. Для упрощения расчета рассмотрим такой случай, когда после отключения катушки от источника сила тока в цепи убывает со временем по линейному закону. При таком условии ЭДС самоиндукции имеет постоянное значение. Это значение определяется выражением $\mathcal{E}_L = -\frac{L\Delta I}{\Delta t} = \frac{LI}{\Delta t}$. Здесь Δt — промежуток времени, в течение которого сила тока в цепи убывает от начального значения I до конечного значения, равного нулю. Итак, ЭДС самоиндукции при линейном законе убывания силы тока равна:

$$\mathcal{E}_L = LI / \Delta t. \quad (62.1)$$

За время Δt при линейном убывании силы тока по цепи проходит электрический заряд

$$q = I_{cp} \Delta t = \frac{I+0}{2} \Delta t = I \Delta t / 2, \quad (62.2)$$

поэтому работа электрического тока, совершаемая за счет энергии магнитного поля, равна:

$$A = q \mathcal{E}_L = \frac{I \Delta t L I}{2 \Delta t} = \frac{L I^2}{2}. \quad (62.3)$$

Отсюда следует, что энергия магнитного поля в катушке

$$W_m = L I^2 / 2. \quad (62.4)$$

Плотность энергии магнитного поля. Полученное выражение попробуем обобщить. Если считать катушку очень длинной (бесконечно длинной в пределе), то все магнитное поле окажется сосредоточенным внутри катушки. Подставив в выражение (62.4) значение индуктивности длинной катушки [см. формулу (61.4)] и выражение для индукции магнитного поля в этой катушке $B = \mu \mu_0 I n$ [см. формулу (54.9)], получим

$$W_m = \frac{1}{2} \mu \mu_0 n^2 S L I^2 = \frac{B^2}{2 \mu \mu_0} S L. \quad (62.5)$$

Но $V = S L$ есть объем катушки. Таким образом, мы можем утверждать, что энергия магнитного поля рассредоточена по всему объему катушки, а плотность энергии магнитного поля

$$w_m = \frac{W_m}{V} = \frac{B^2}{2 \mu \mu_0}. \quad (62.6)$$

Дж. Максвелл показал, что это выражение, полученное нами для частного случая длинной катушки, справедливо для любых магнитных полей.

Плотность энергии электромагнитного поля. В § 46 мы показали, что электрическое поле обладает энергией. Для плоского конденсатора мы получили выражение $W_e = \frac{C U^2}{2}$, а для плотности энергии электрического поля — выражение $w_e = \frac{\epsilon \epsilon_0 E^2}{2}$.

В общем случае плотность энергии электромагнитного поля равна:

$$w = w_e + w_m = \frac{\epsilon \epsilon_0 E^2}{2} + \frac{B^2}{2 \mu \mu_0}. \quad (62.7)$$

Заметим, что при переходе из одной инерциальной системы отсчета в другую напряженность $\vec{E}$ и индукция $\vec{B}$ будут меняться. Более того, в некоторых случаях один из этих векторов может оказаться равным нулю. Но энергия электромагнитного поля не исчезает, она сохраняется во всех системах отсчета.

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Задача. Два одинаковых конденсатора, емкость каждого из которых равна C , и катушка индуктивностью L соединены так, как показано на рисунке 7.9. В начальный момент времени ключи разомкнуты, конденсатор $C1$ заряжен до напряжения U , а конденсатор $C2$ не заряжен. Чему равна максимальная сила тока в катушке после замыкания ключей?

Решение. После замыкания ключа $K1$ заряд конденсатора $C1$ перераспределяется между конденсаторами $C1$ и $C2$ до равенства их напряжений:

$$\begin{cases} q = q_1 + q_2, \\ U_1 = U_2, \end{cases} \quad \text{или} \quad \begin{cases} q = q_1 + q_2, \\ \frac{q_1}{C} = \frac{q_2}{C}. \end{cases}$$

Отсюда $q_1 = q_2 = q/2$, $U_1 = U_2 = U/2$.

Следовательно, энергия обоих конденсаторов после замыкания ключа равна:

$$W_2 = \frac{CU_1^2}{2} + \frac{CU_2^2}{2} = \frac{C}{2} \left(\frac{U^2}{4} + \frac{U^2}{4} \right) = \frac{CU^2}{4}.$$

Сравнивая эту энергию с энергией одного конденсатора до замыкания ключа $W_1 = \frac{CU^2}{2}$, мы видим, что половина энергии конденсатора как бы исчезла, но это противоречит закону сохранения энергии. На самом деле энергия не исчезла — она израсходовалась на создание искры в момент контакта электродов ключа и на нагрев соединительных проводов, т. е. превратилась в конечном счете во внутреннюю энергию окружающей среды. Замкнем ключ $K2$.

В тот момент, когда вся энергия электрического поля конденсаторов превращается в энергию магнитного поля катушки, на основании закона сохранения энергии выполняется равенство $\frac{CU^2}{4} = \frac{LI_{\max}^2}{2}$, откуда $I = U\sqrt{\frac{C}{2L}}$.

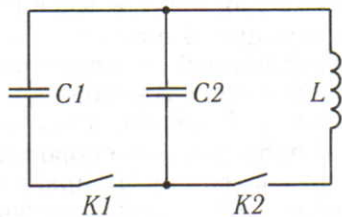


рис. 7.9

Задачи для самостоятельного решения

62.1. В обмотке катушки индуктивностью 5,2 мГн сила тока равна 20 А. Найдите энергию магнитного поля катушки и плотность энергии; объем катушки 200 см³.

62.2. Конденсатор с емкостью 600 мкФ заряжен до напряжения 300 В. Его замыкают на катушку с индуктивностью 25 мГн. Найдите максимальную силу тока в катушке.

§ 63 Электрический генератор постоянного тока

Превращение механической энергии в электрическую. Явление электромагнитной индукции используется в электрических генераторах постоянного тока. При движении проводника длиной l в магнитном поле перпендикулярно вектору индукции $\vec{B}$ в нем под действием ЭДС индукции создается индукционный электрический ток I . На проводник с током действует сила Ампера $F_A = IBl$. Применяя правило левой руки, можно убедиться, что направление силы Ампера противоположно направлению скорости движения проводника $\vec{v}$ (рис. 7.10), что соответствует правилу Ленца. Следовательно, для равномерного движения проводника к нему должна быть приложена сила $\vec{F}$, равная по модулю силе Ампера $\vec{F}_A$, но направленная в противоположную сторону: $\vec{F} = -\vec{F}_A$. Эта сила при перемещении проводника на расстояние $\Delta x = v\Delta t$ совершает работу:

$$A = F\Delta x = IBlv\Delta t = \frac{q}{\Delta t} Blv\Delta t = q\mathcal{E}_{\text{инд}}. \quad (63.1)$$

Мы видим, что работа внешних сил, вызывающих движение проводника в магнитном поле, равна работе ЭДС индукции в электрической цепи. Магнитное поле является причиной разделения электрических зарядов в движущемся проводнике, но не является источником энергии электрического тока. Вектор магнитной силы, действующей на движущиеся электрические заряды, перпендикулярен вектору скорости заряда, поэтому работа магнитных сил всегда равна нулю.

Более полный ответ на вопрос о роли силы Лоренца и внешних сил в возникновении ЭДС индукции можно получить на основании рассмотрения рисунка 7.11.

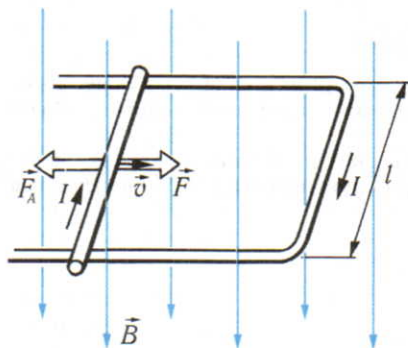


рис. 7.10

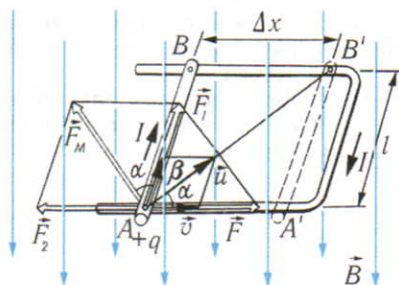


рис. 7.11

При равномерном движении проводника AB в магнитном поле в нем возникает индукционный электрический ток. За время Δt , необходимое для перемещения зарядов на расстояние l от конца A к концу B , проводник перемещается на расстояние $\Delta x = v\Delta t$. В результате свободные электрические заряды за время Δt перемещаются из точки A в точку B' со скоростью $u = v/\cos \alpha$.

Вектор $\vec{F}_m$ силы Лоренца, действующей на положительный электрический заряд q , направлен перпендикулярно вектору $\vec{B}$ магнитной индукции и вектору $\vec{u}$ скорости заряда. Модуль силы Лоренца равен:

$$F_m = quB = qvB/\cos \alpha. \quad (63.2)$$

Если проводник AB движется равномерно со скоростью $\vec{v}$, то это значит, что равнодействующая $\vec{F}_1$ силы Лоренца $\vec{F}_m$ и внешней силы $\vec{F}$ направлена вдоль проводника AB . Модуль равнодействующей равен: $F_1 = F_m \cos \alpha$.

Найдем работу силы $\vec{F}_1$ при перемещении заряда q от точки A до точки B в движущемся проводнике. Эта работа равна:

$$A = F_1 l = F_m l \cos \alpha = \frac{qvBl \cos \alpha}{\cos \alpha} = qvBl. \quad (63.3)$$

Так как $\mathcal{E}_{\text{инд}} = vBl$ [см. формулу (59.6)], то эта работа равна:

$$A = q\mathcal{E}_{\text{инд}}. \quad (63.4)$$

Вектор силы Лоренца $\vec{F}_m$ перпендикулярен вектору скорости $\vec{u}$ движения электрических зарядов, но вектор равнодействующей $\vec{F}_1 = \vec{F}_m + \vec{F}$ направлен под углом $\beta = 90^\circ - \alpha$ к вектору скорости $\vec{u}$. Работа равнодействующей служит источником ЭДС индукции. Фактически же работу совершает только внешняя сила $\vec{F}$.

На эту картину можно посмотреть иначе. Разложим вектор $\vec{F}_m$ силы Лоренца на две составляющие — $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$, направленные вдоль проводника AB и перпендикулярно к нему. Так как проводник движется равномерно, то составляющая $\vec{F}_2$ равна по модулю внешней силе $\vec{F}$ и направлена противоположно: $\vec{F}_2 = -\vec{F}$.

Суммарная работа этих двух сил равна нулю. Следовательно, полная работа всех сил, действующих на электрические заряды в проводнике, равна работе составляющей $\vec{F}_1$ силы Лоренца. Работа этой силы отлична от нуля, хотя работа силы Лоренца $\vec{F}_m$ равна нулю.

Машина постоянного тока как электрический генератор. На явлении возникновения ЭДС индукции в рамке при вращении ее в однородном магнитном поле основан принцип действия машины постоянного тока как генератора. Как и двигатель, генератор состоит из двух основных частей —

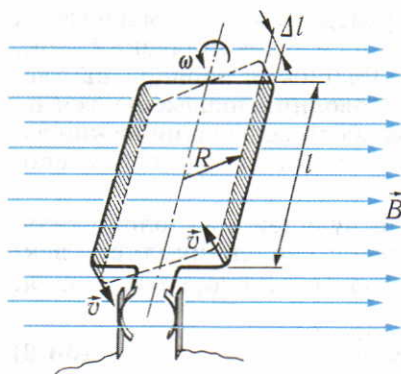


рис. 7.12

индуктора и якоря, обмотка которого через коллектор и щетки соединяется с внешней цепью.

При пропускании постоянного тока через обмотки индуктора между его полюсными наконечниками создается магнитное поле. В магнитном поле индуктора вращается якорь. Якорь имеет сердечник цилиндрической формы, набранный из изолированных листов стали. Кон-

цы обмоток якоря присоединены к пластинам коллектора.

При вращении якоря в магнитном поле индуктора в его обмотке возникает ЭДС индукции. Через скользящие контакты коллектора с внешней электрической цепью соединяются выводы от той обмотки, плоскость которой в данный момент времени расположена параллельно вектору индукции магнитного поля (рис. 7.12).

Модуль ЭДС индукции в одном витке вращающегося якоря равен:

$$\mathcal{E} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{B\Delta S}{\Delta t}. \quad (63.5)$$

Изменение площади контура, пронизываемого магнитным потоком перпендикулярно вектору магнитной индукции, равно:

$$\Delta S = 2l\Delta l. \quad (63.6)$$

При малых значениях угла поворота витка отрезок Δl примерно равен длине дуги радиусом R :

$$\Delta l \approx v\Delta t = \frac{2\pi R}{T} \Delta t = 2\pi Rv\Delta t, \quad (63.7)$$

где v — скорость движения проводника; T и v — соответственно период и частота вращения якоря.

Подставив выражения (63.6) и (63.7) в формулу (63.5), получим

$$\mathcal{E} = 4\pi BRlv. \quad (63.8)$$

Если же обмотка содержит N витков, то

$$\mathcal{E} = 4\pi NBRlv. \quad (63.9)$$

Учитывая, что $S = 2Rl$ есть площадь рамки, а $\Phi_{\max} = BS = 2BRl$ есть максимальный магнитный поток, пронизывающий рамку, получим еще одно важное выражение для ЭДС генератора постоянного тока:

$$\mathcal{E} = 2\pi N\Phi_{\max} \nu. \quad (63.10)$$

В генераторе постоянного тока питание обмоток индуктора может производиться током, который вырабатывает сам генератор. Генератор постоянного тока с самовозбуждением часто называют *динамо-машиной*.

Обмотку индуктора можно присоединять либо параллельно, либо последовательно с якорем. В динамо-машине, как правило, применяется параллельное соединение индуктора с внешней цепью. В этом случае ЭДС мало зависит от сопротивления внешней нагрузки, а ее значение можно легко регулировать, изменяя реостатом силу тока в обмотке индуктора и тем самым индукцию магнитного поля. Постоянство скорости вращения якоря обеспечивается первичным двигателем, приводящим якорь во вращение. Первичным двигателем может служить тепловая машина, гидротурбина, ветродвигатель.

■ Вопросы

1. Каким образом в генераторе постоянного тока происходит превращение механической энергии в электрическую? 2. Каков принцип действия машинного генератора постоянного тока? 3. От чего зависит напряжение на выходе генератора постоянного тока? 4. Каким образом машина постоянного тока может быть использована в качестве электродвигателя? 5. В чем сущность обратимости электрических машин постоянного тока? Как это согласуется с законом сохранения энергии?

■ Задачи для самостоятельного решения

63.1. Якорь генератора постоянного тока вращается с частотой 20 об/с. Чему равно напряжение на выходе генератора, если радиус якоря 8 см, а число витков в обмотке равно 20? Длина стороны рамки 25 см, индукция магнитного поля 0,6 Тл.

63.2. Максимальный магнитный поток, пронизывающий обмотку якоря, равен $8,0 \cdot 10^{-3}$ Вб. Якорь совершает 50 об/с. Сколько витков должна содержать одна секция обмотки якоря, чтобы возникла ЭДС, равная 65 В?

§ 64 Магнитная запись информации

Проблема записи и воспроизведения звука. Наиболее привычный для каждого человека способ обмена информацией — это речь. При обмене информацией с помощью речи один человек возбуждает звуковые колебания в воздухе с помощью голосовых связок, другой воспринимает эти колебания с помощью органов слуха.

Недостатком такого способа обмена информацией является возможность ее передачи только на сравнительно небольшие расстояния и невозможность сохранения и воспроизведения в любое время.

Способ механической записи и воспроизведения звука изобрел американский изобретатель Т. Эдисон. Однако механический способ не обеспечивает высокого качества звучания.

Микрофон и громкоговоритель. Первыми шагами к созданию современных способов записи и воспроизведения звука было изобретение микрофона и громкоговорителя. Микрофоном называется прибор для преобразования звуковых колебаний в электрические. Изменения давления, происходящие при распространении звуковых волн в воздухе, позволяют использовать для их регистрации и изучения микрофоны различных конструкций.

В *электродинамическом микрофоне* имеется тонкая гибкая мембрана 1, к которой приклеена легкая проволочная катушка 2. Катушка расположена в кольцевом зазоре между полюсами постоянного магнита 3 (рис. 7.13). Колебания давления воздуха, возникающие при прохождении звуковой волны, вызывают колебания мембраны микрофона и соединенной с ней проволочной катушки. Колебания катушки в магнитном поле постоянного магнита приводят к возникновению в ней переменной ЭДС индукции. Таким образом в электродинамическом микрофоне происходит преобразование звуковых колебаний в электрические.

Для обратного преобразования электрических колебаний в звуковые применяется громкоговоритель. Основными частями *электродинамического громкоговорителя* (динамика) являются кольцевой постоянный магнит 1, проволочная катушка 2 и диффузор 3, к которому прикреплена катушка (рис. 7.14). При пропускании через катушку 2 переменного тока звуковой частоты на нее действует со стороны магнитного поля переменная сила Ампера. Под действием этой силы катушка вместе с диффузором совершает колебания, что вызывает изменения давления воздуха, т. е. возбуждает звуковые волны.

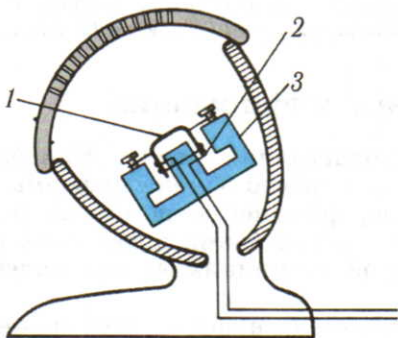


рис. 7.13

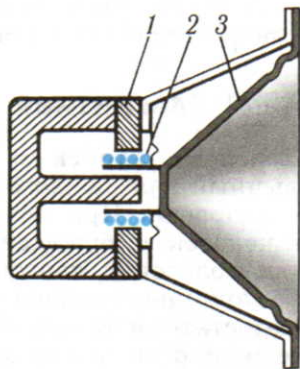


рис. 7.14

Магнитная запись и воспроизведение звука. Одним из наиболее распространенных способов сохранения и последующего воспроизведения звуков — речи и музыки — является магнитная запись. Она основана на свойстве ферромагнетиков сохранять остаточное намагничивание после снятия внешнего магнитного поля.

Запись звука в магнитофонах производится на тонкую пластмассовую ленту, покрытую слоем порошка ферромагнитного материала. Колебания воздуха в звуковой волне преобразуются с помощью микрофона M в колебания силы тока в электрической цепи (рис. 7.15). После усиления этих колебаний с помощью усилителя $УЗ$ переменный ток звуковой частоты поступает в обмотку кольцевого электромагнита головки записи $ГЗ$. При протягивании магнитной ленты около зазора между полюсами кольцевого электромагнита различные участки ленты намагничиваются в соответствии с изменениями силы тока в обмотке. Полоса на ленте, намагниченная в процессе записи, называется дорожкой записи.

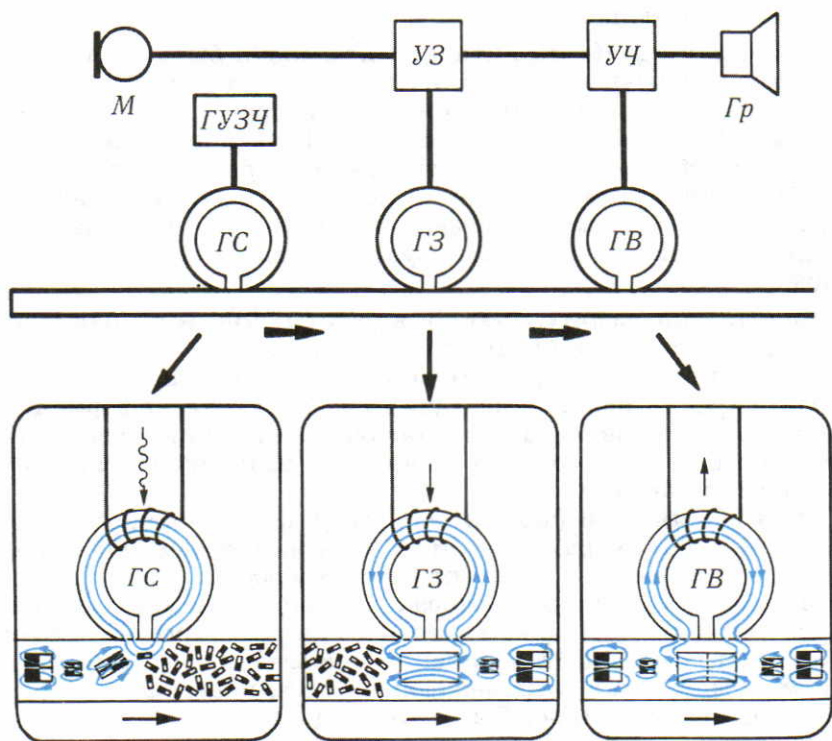


рис. 7.15

Для воспроизведения записи магнитная лента протягивается перед зазором кольцевого электромагнита головки воспроизведения ГВ с той же скоростью, с которой она протягивалась при записи.

При движении намагниченной ленты происходят изменения магнитного поля в зазоре головки воспроизведения, и в ее обмотке возникает переменная ЭДС индукции.

Переменное напряжение с выхода обмотки головки воспроизведения усиливается с помощью усилителя воспроизведения УВ. Усиленное напряжение звуковой частоты подводится к катушке громкоговорителя ГР. Переменный ток в катушке громкоговорителя вызывает колебания катушки в магнитном поле постоянного магнита. Прикрепленный к катушке диффузор воспроизводит звук.

Для стирания ненужной записи с ленты служит магнитная головка стирания записи ГС, к обмотке которой подводится переменное напряжение от генератора ультразвуковой частоты ГУЗЧ.

В бытовых магнитофонах при записи и воспроизведении обычно используется одна и та же универсальная головка и один усилитель.

Видеозапись. На магнитную ленту может быть записан не только сигнал звуковой частоты, но и сигнал для управления электронным пучком кинескопа телевизора.

На магнитную ленту видеомэгнитофона записывается информация об изображении и звуковом сопровождении.

При считывании записи с ленты с помощью магнитных головок на экране телевизора получается изображение и динамик воспроизводит звуковое сопровождение изображения.

Магнитная память ЭВМ. Для работы ЭВМ необходим обмен информацией с внешними устройствами.

Так как вся информация для компьютера представляет собой набор сигналов типа «да» или «нет», эта информация может быть записана на магнитную ленту или магнитный диск в виде чередующихся участков с различной полярностью намагничивания.

Тем самым информация записывается в двоичном коде, где «единица» характеризуется намагниченным участком, а «ноль» — ненамагниченным (или наоборот).

В персональных компьютерах для записи информации используется тонкий пластмассовый диск, покрытый слоем магнитного материала. Запись и считывание производятся с помощью головки, перемещающейся над поверхностью диска по его радиусу (рис. 7.16). Диск вращается со скоростью 300 об/мин, запись производится на концентрических дорожках, продольная плотность записи информации достига-

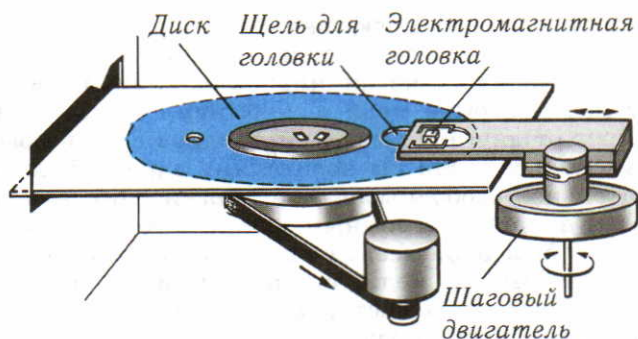


рис. 7.16

ет 275 бит/мм. Полная емкость записи информации на одной стороне диска диаметром 90 мм достигает 720 кбайт.

■ Вопросы

1. Каков принцип действия микрофона? 2. Как работает громкоговоритель? 3. Как осуществляется магнитная запись звука? 4. Как осуществляется воспроизведение магнитной звукозаписи? 5. Для чего в магнитофоне используется головка стирания? 6. Как устроена магнитная память компьютера?



ГЛАВА 8

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ

§ 65

Электрический ток в металлах

Природа электрического тока в металлах. Электрический ток в металлических проводниках никаких изменений в этих проводниках, кроме их нагревания, не вызывает. Это было подтверждено опытами Э. Рикке (1901). В этих опытах электрический ток пропускали в течение года через три прижатых друг к другу, хорошо отшлифованных цилиндра — медный, алюминиевый и снова медный (рис. 8.1). Общий заряд, прошедший за это время через цилиндры, был очень велик (около $3,5 \cdot 10^6$ Кл). После окончания опытов было установлено, что имеются лишь незначительные следы взаимного проникновения металлов, которые не превыша-

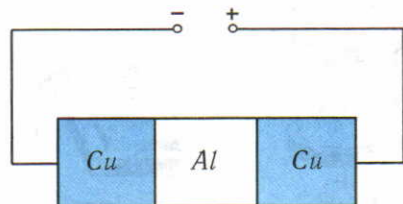


рис. 8.1

ют результатов обычной диффузии атомов в твердых телах. Измерения, проведенные с высокой степенью точности, показали, что масса каждого из цилиндров осталась неизменной. Поскольку массы атомов меди и алюминия существенно отличаются друг от друга, то масса цилиндров должна была бы заметно измениться, если бы носителями заряда были ионы.

Следовательно, свободными носителями заряда в металлах являются не ионы. Огромный заряд, который прошел через цилиндры, был перенесен, очевидно, такими частицами, которые одинаковы и в меди, и в алюминии. Как известно, такие частицы входят в состав атомов всех веществ — это электроны. Естественно предположить, что ток в металлах осуществляют именно свободные электроны.

Прямое и убедительное доказательство справедливости этого предположения было получено в опытах, поставленных в 1913 г. русскими физиками Л. И. Мандельштамом и Н. Д. Папалекси и в 1916 г. английскими физиками Р. Толменом и Т. Стюартом.

В основе этих опытов лежит предположение о том, что в металлах имеются свободные электроны, оторвавшиеся от атомов. Эти свободные электроны движутся в пространстве между ионами кристаллической решетки.

Если металлический проводник привести в движение и резко затормозить, то свободные электроны должны по инерции продолжать движение относительно ионной решетки. Следовательно, в проводнике должен возникнуть кратковременный ток. Кратковременное движение электронов в проводнике в этом случае подобно отклонению пассажиров автобуса по направлению его движения при резком торможении автобуса.

Опыт по обнаружению инерционного движения электронов в металле был поставлен следующим образом. На катушку наматывают проволоку, концы которой припаивают к двум металлическим дискам, изолированным друг от друга (рис. 8.2). Диски при помощи скользящих контактов соеди-

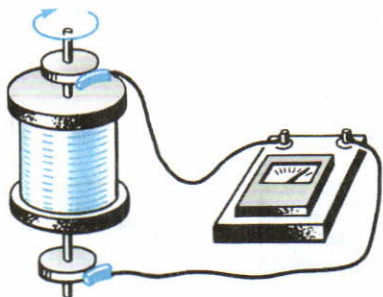


рис. 8.2

единяются с чувствительным гальванометром. Катушку приводят в быстрое вращение, а затем резко останавливают. Стрелка гальванометра при торможении катушки отклоняется, что говорит о возникновении кратковременного тока. По направлению отклонения стрелки было установлено, что ток создается движением именно отрицательно заряженных частиц.

На основании измерения количества электричества, протекшего через гальванометр, данных, относящихся к проводнику, намотанному на катушку, и скорости движения катушки до торможения удалось вычислить отношение заряда частиц, создавших ток, к их массе (q_0/m).

Измерения дали для отношения модуля заряда электрона к его массе следующее значение:

$$\frac{e}{m} = 1,8 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг.}$$

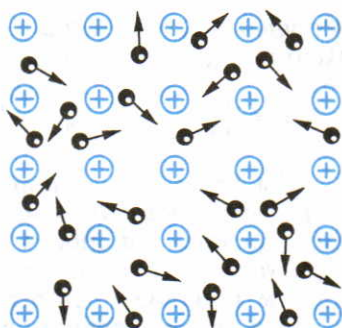


рис. 8.3

Концентрация электронов проводимости в металле (т. е. их число в единице объема) очень велика: по порядку величины она равна числу атомов в единице объема металла. Этим объясняется хорошая электропроводность металлов.

Электроны в металлах находятся в непрерывном движении. Их беспорядочное движение (рис. 8.3) напоминает движение молекул идеального газа. Это дало основание считать, что электроны в металлах образуют своеобразный электронный газ. Но скорость беспорядочного движения электронов в металле значительно больше скорости молекул в газе (она составляет примерно 10^5 м/с).

Когда в металле создается электрическое поле, оно действует на электроны с некоторой силой и сообщает им ускорение.

Сталкиваясь с ионами, колеблющимися в узлах кристаллической решетки, электроны отдают им свою энергию. А увеличение энергии ионов означает повышение температуры проводника. Вот почему при прохождении тока проводники нагреваются.

Средняя скорость движения электронов под действием поля (скорость дрейфа). Выразим силу тока I в проводнике через заряд e электрона, концентрацию n электронов проводимости, площадь S поперечного сечения проводника и среднюю скорость $\bar{v}$ упорядоченного движения электронов:

$$I = q_0 n S \bar{v}, \text{ или } I = en S \bar{v}. \quad (65.4)$$

Используя формулу (65.4), рассчитаем среднюю скорость упорядоченного движения электронов, например, в медном проводнике сечением 1 мм^2 при силе тока 10 А .

У большинства металлов концентрация электронов проводимости примерно равна концентрации атомов и находится

в пределах $10^{28} - 10^{29} \text{ м}^{-3}$. В частности, для меди $n = 9 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$. Поэтому для меди получаем

$$\bar{v} = \frac{I}{enS} = \frac{10 \text{ А}}{9 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 10^{-6} \text{ м}^2} \approx 7 \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}}{\text{с}} \approx 0,7 \frac{\text{мм}}{\text{с}}.$$

Мы видим, что скорость упорядоченного переноса (дрейфа) электронов очень мала. Она в сотни миллионов раз меньше средней скорости теплового движения электронов. При такой скорости для перемещения электрона всего лишь на 5 м понадобилось бы время, равное примерно 2 ч.

Между тем хорошо известно, что, как только мы повернем выключатель, лампа, находящаяся в нескольких десятках метров от него, загорается «мгновенно». Вообще, при замыкании электрической цепи все приборы, на каком бы расстоянии они ни находились друг от друга, начинают действовать практически одновременно. Отсюда следует, что скорость распространения тока и скорость упорядоченного перемещения носителей тока — это не одно и то же.

Скорость распространения тока в проводниках. Когда говорят об огромной скорости распространения тока в проводниках, то имеют в виду, что с такой скоростью распространяется действие электрического поля на заряды в проводнике. Оно увлекает в упорядоченное движение почти мгновенно все свободные электроны, находящиеся в различных точках проводника, даже очень удаленных друг от друга. Электрическое поле распространяется со скоростью $300\,000 \text{ км/с}$, т. е. со скоростью света. Эту скорость и имеют в виду, когда говорят о скорости распространения тока. В то же время электроны в проводнике, в любой его точке, перемещаются под действием поля с очень малой скоростью, измеряемой долями миллиметра в секунду.

■ Вопросы

1. Как движутся электроны проводимости в металлическом проводнике: а) когда в нем нет электрического поля? б) когда в нем создано электрическое поле? 2. Почему при малой скорости упорядоченного движения электронов в металлическом проводнике приборы, включенные в одну и ту же цепь и расположенные на больших расстояниях друг от друга, начинают действовать одновременно?

■ Задачи для самостоятельного решения

65.1. На какое расстояние переместятся электроны по медному проводнику сечением 4 мм^2 при силе тока 10 А за 5 с ? На какое расстояние распространился бы ток за это время?

65.2. Сила тока в проводнике, площадь сечения которого $0,2 \text{ мм}^2$, равна 1 А . Концентрация свободных электронов в проводнике равна $5 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$. Определите среднюю скорость упорядоченного перемещения электронов в этом проводнике.

Зависимость сопротивления проводников от температуры. Сопротивление металлов связано с тем, что электроны, движущиеся в проводнике, взаимодействуют с ионами кристаллической решетки и теряют при этом часть энергии, которую они приобретают в электрическом поле.

Из физических величин, которыми определяется удельное сопротивление металла ($\rho = \frac{2m}{e^2 n \tau}$), масса и заряд электрона — универсальные постоянные. Концентрация электронов проводимости в металлах практически не зависит от внешних условий, в частности от температуры. Время же свободного пробега и, следовательно, число соударений электронов с ионами решетки зависит от температуры. Поэтому следует ожидать, что удельное сопротивление металлов должно зависеть от температуры.

Опыт показывает, что сопротивление металлов действительно зависит от температуры. В этом легко убедиться.

Включим в цепь, содержащую батарею аккумуляторов, стальную спираль (рис. 8.4). Последовательно с ней включим лампу, по свечению которой можно судить об изменении силы тока в цепи.

Нагревая спираль при помощи горелки, мы увидим, что яркость лампочки уменьшилась, следовательно, ток в цепи уменьшился. Значит, при нагревании стального проводника его сопротивление увеличивается. Заменяя стальную спираль другими металлическими проводниками, можно убедиться в том, что при повышении температуры сопротивление всех металлов увеличивается приблизительно пропорционально их абсолютной температуре.

Зависимость удельного сопротивления металлического проводника от температуры выражается линейной функцией

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha \Delta T). \quad (66.1)$$

Каждое вещество можно характеризовать постоянной для него величиной, называемой *температурным коэффициентом сопротивления* α . Этот коэффициент равен относительно-

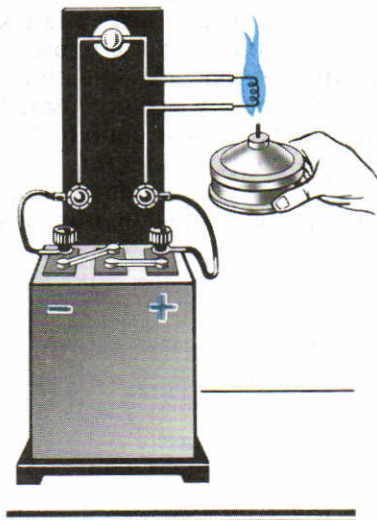


рис. 8.4

му изменению удельного сопротивления проводника при его нагревании на 1 К:

$$\alpha = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0 \Delta T}, \quad (66.2)$$

где ρ_0 — удельное сопротивление при температуре $T_0 = 273$ К (0°C); ρ — удельное сопротивление при данной температуре T , $\Delta T = T - 273$ К.

Графически зависимость (66.1) представлена на рисунке 8.5.

Зависимость сопротивления от температуры выражается такой же функцией

$$R = R_0(1 + \alpha \Delta T). \quad (66.3)$$

Температурные коэффициенты сопротивления чистых металлов сравнительно мало отличаются друг от друга и примерно равны $0,004 \text{ K}^{-1}$. Температурные коэффициенты сопротивления сплавов, как правило, значительно меньше, чем у чистых металлов. Существуют специальные сплавы, сопротивление которых практически не изменяется при нагревании. Таковы, например, сплавы константан и манганин. У манганина $\alpha = 0,00001 \text{ K}^{-1}$, у константана $\alpha = 0,00005 \text{ K}^{-1}$. Проводники из этих сплавов применяются при изготовлении точных измерительных приборов, а также эталонов сопротивления.

Изменения сопротивления проводников при изменении температуры приводит к тому, что их вольт-амперная характеристика нелинейна. Это особенно заметно в тех случаях, когда температура проводников значительно изменяется, например при работе лампы накаливания. На рисунке 8.6 приведена ее вольт-амперная характеристика. Как видно из рисунка, сила тока в этом случае не прямо пропорциональна напряжению. Не следует, однако, думать, что этот вывод противоречит закону Ома. Напомним, что зависимость, сформулированная в законе Ома, справедлива только при постоянном сопротивлении.

Зависимость сопротивления металлических проводников от температуры используют в различных измерительных

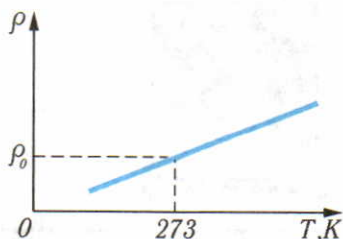


рис. 8.5

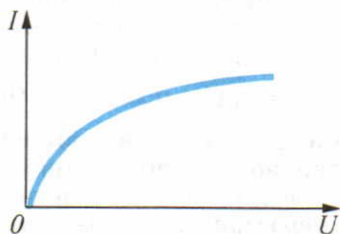


рис. 8.6

и автоматических устройствах. Наиболее важным из них является термометр сопротивления.

Основной частью термометра сопротивления служит платиновая проволока, намотанная на керамический каркас (рис. 8.7). Проволоку помещают в среду, температуру которой нужно определить. Измеряя сопротивление этой проволоки и зная ее сопротивление при $t_0 = 0^\circ\text{C}$ (т. е. R_0), рассчитывают температуру среды.



рис. 8.7

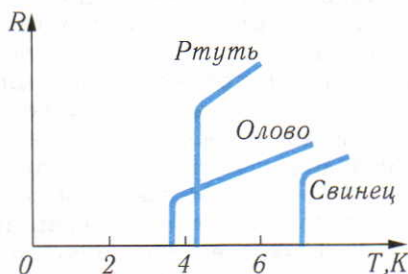


рис. 8.8

Термометры сопротивления обладают тем достоинством, что ими можно пользоваться как при очень низких, так и при весьма высоких температурах, при которых применение обычных, жидкостных термометров невозможно. Чувствительные термометры сопротивления позволяют измерять температуру с точностью до тысячных долей градуса.

Сверхпроводимость. Как было выяснено, сопротивление металлических проводников уменьшается при понижении температуры. Однако до конца XIX в. нельзя было проверить, как зависит сопротивление проводников от температуры в области очень низких температур. Только в начале XX в. голландскому ученому Г. Камерлинг-Оннесу удалось превратить в жидкое состояние наиболее трудно конденсируемый газ — гелий. Температура кипения жидкого гелия равна 4,2 К. Это и дало возможность измерить сопротивление некоторых чистых металлов при их охлаждении до очень низкой температуры.

В 1911 г. работа Камерлинг-Оннеса завершилась крупнейшим открытием. Исследуя сопротивление ртути при ее охлаждении, он обнаружил, что при температуре 4,12 К сопротивление ртути скачком падало до нуля (рис. 8.8). В дальнейшем ему удалось это же явление наблюдать и у ряда других металлов при их охлаждении до температур, близких к абсолютному нулю. Оказалось, что при некоторой характерной для каждого из них температуре сопротивление падало до нуля.

Явление полной потери металлом электрического сопротивления при определенной температуре получило название *сверхпроводимости*.

Удивительное свойство сверхпроводимости особенно наглядно было продемонстрировано на заре открытия этого явления в опытах со свинцовым кольцом, находящимся при

температуре, близкой к абсолютному нулю. Если создать в цепи ток, а затем источник отключить, то в обычных проводниках ток очень быстро (практически мгновенно) затухает. Ток же, возникающий в сверхпроводнике, может сохраняться неограниченно долго благодаря отсутствию сопротивления. Один из таких опытов был произведен в 1959 г. Через 2,5 года после начала опыта никакого уменьшения силы тока в кольце отмечено не было.

Интерес к явлению сверхпроводимости в современной науке возрастал по мере обнаружения материалов, у которых сверхпроводимость наступала при более высоких температурах. До 1987 г. были известны сверхпроводники, обладающие этим свойством только при очень низких температурах — примерно 30 К. Такие температуры называют «гелиевыми», так как их можно получить только при сжижении гелия. Однако гелия в природе очень мало, техника его сжижения очень сложна. Но вот в марте 1987 г. стало известно, что обнаружены материалы, обладающие сверхпроводимостью при значительно более высокой температуре — около 100 К. Это известие вызвало подлинный энтузиазм у физиков. Казалось бы, что же здесь особенного, температура сверхпроводимости все равно очень низкая (-170°C). Но все дело в том, что -170°C — это температура жидкого азота. А азота в природе очень много (воздух на 80% состоит из азота), технология получения жидкого азота хорошо разработана, и стоит он недорого. Последние сообщения об исследованиях в области сверхпроводимости сулят еще лучшие перспективы: в научных исследованиях получены еще более высокотемпературные сверхпроводящие материалы. Исследования в этой области ведутся очень интенсивно. Теоретически предсказана даже возможность получения сверхпроводящих материалов при комнатной температуре. Интересно и то, что такими сверхпроводящими материалами являются не какие-нибудь сложно получаемые материалы, а простая керамика. Из этого хрупкого материала в настоящее время научились получать сверхпроводящие пластины и проволоку, пригодные для технологического использования.

Технические применения высокотемпературных сверхпроводников. Получение высокотемпературных сверхпроводящих материалов открывает широкие возможности их технического применения.

В энергетике сверхпроводящие материалы могут произвести полный переворот. Сверхпроводящие кабели способны передавать огромную энергию на большие расстояния совершенно без потерь.

Сверхпроводящие обмотки электромагнитов дают возможность получить гораздо более сильные токи, чем в обычных, и создавать таким образом очень сильное магнитное поле с индукцией порядка 10—20 Тл.

Отметим еще одно удивительное применение высокотемпературной сверхпроводимости, связанное с давно занимающей умы инженеров идеей создания скоростных поездов, движущихся не на колесах, а на «магнитной подушке».

Замечательное явление в 1945 г. продемонстрировал профессор Московского университета В. К. Аркадьев с помощью эффектного опыта. Он взял небольшой постоянный магнит и начал опускать его на веревочке в свинцовую чашу, охлажденную жидким гелием. При столь низкой температуре свинец становится сверхпроводником. При опускании магнита в чашу натяжение веревочки ослабело, и довольно тяжелый магнит повис в воздухе без всякой видимой поддержки. Сверхпроводящая чаша отталкивала магнит действием магнитных полей индукционных токов, создаваемых падающим магнитом в сверхпроводнике. Магнит парит над чашей, поддерживаемый действующим на него магнитным полем. Магнит не покоится над сверхпроводником, а непрерывно «дрожит», падая и отталкиваясь от сверхпроводника. Такое «парение» магнита над сверхпроводником (либо наоборот — сверхпроводника над магнитом) называется левитацией (рис. 8.9). На явлении магнитной левитации и основана идея устройства поездов, которые, «паря» в воздухе над магнитным полем, развивали бы огромную скорость движения — несколько сот километров в час.

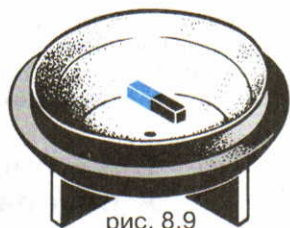


рис. 8.9

■ Вопросы

1. В чем причина зависимости сопротивления проводников от температуры? 2. При включении электрической лампы накаливания сила тока в первый момент значительно отличается от силы тока в лампе, когда она начнет светиться. Объясните причину этого явления. 3. В чем состоит явление сверхпроводимости?

■ Задачи для самостоятельного решения

66.1. Электрическое сопротивление вольфрамовой нити электрической лампы при температуре 23°C равно 4 Ом . Найдите электрическое сопротивление нити при 0°C . Температурный коэффициент электрического сопротивления вольфрама равен $4,8 \cdot 10^{-3}\text{ K}^{-1}$.

66.2. Каков температурный коэффициент электрического сопротивления материала проводника, если при нагревании от 0°C до 100°C его электрическое сопротивление увеличилось на $0,1\%$?

66.3. Электрическая плитка мощностью 600 Вт рассчитана на напряжение 220 В . При работе плитки температура нихромовой нити (температурный коэффициент сопротивления $\alpha = 0,0001\text{ K}^{-1}$) равна 500°C . Чему равно сопротивление плитки в нерабочем состоянии?

66.4. Угольный стержень соединен последовательно с железным стержнем такой же толщины. При каком соотношении их длин сопротивление дан-

ной комбинации не зависит от температуры? Температурные коэффициенты сопротивления угля и железа соответственно равны $\alpha_1 = -8 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ и $\alpha_2 = 6 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, удельные электрические сопротивления угля и железа считать соответственно равными $\rho_1 = 4,10 \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ и $\rho_2 = 1,2 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

§ 67 Электрический ток в растворах и расплавах электролитов

Носители электрического заряда в растворах и расплавах электролитов. Электрический ток в металлах никакими химическими процессами не сопровождается. Это объясняется тем, что носителями тока в металлах являются электроны. Но существует такой класс проводников, в которых электрический ток всегда сопровождается определенными химическими изменениями: растворы солей, кислот и оснований, т. е. растворы электролитов, а также их расплавы.

Соединим с источником тока последовательно лампу и электролитическую ванну с дистиллированной водой, в которую опущены угольные электроды. Химически чистая вода почти не проводит электрического тока. Замкнув цепь, мы увидим, что лампа не горит. Однако если мы растворим в воде какую-нибудь соль, например медный купорос, то лампа загорится, а на катоде из раствора выделится медь (рис. 8.10).

При протекании электрического тока через растворы электролитов вместе с зарядом всегда переносится вещество. Это явление называется *электролизом*. Отсюда следует, что носителями тока в этих проводниках являются заряженные атомы, или группы атомов, т. е. ионы.

Как известно из курса химии, при растворении в воде солей, кислот и щелочей нейтральные молекулы этих веществ расщепляются на положительные и отрицательные ионы.

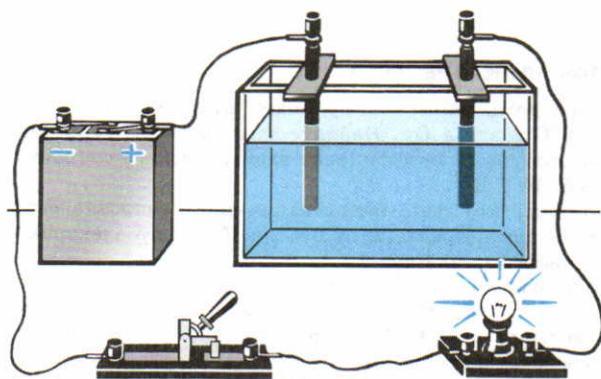


рис. 8.10

Это явление называется *электролитической диссоциацией*. Растворы электролитов всегда содержат некоторое число ионов: катионов (положительных ионов) и анионов (отрицательных ионов). Пока электрическое поле отсутствует, ионы совершают только беспорядочное тепловое движение. Но в электрическом поле ионы, подобно электронам в металлах, начинают дрейфовать в направлении действующей на них силы: катионы — к катоду, анионы — к аноду (рис. 8.11).

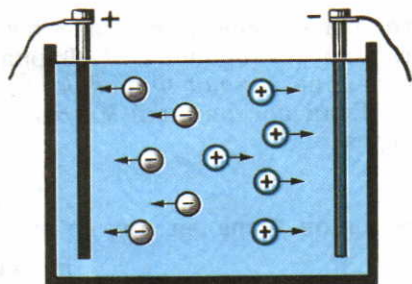


рис. 8.11

Электрический ток в растворах (или расплавах) электролитов представляет собой перемещение ионов обоих знаков в противоположных направлениях.

Опыт показывает, что сила тока при постоянном сопротивлении электролитов линейно зависит от напряжения, т. е. для растворов электролитов справедлив закон Ома.

Закон Фарадея. Электронная теория позволяет рассчитать массу веществ, выделяющихся на электродах при электролизе. Она равна произведению массы одного иона m_0 на число ионов N , которые осели на электроде. Масса одного иона $m_0 = \frac{M}{N_A}$, где M — молярная масса вещества; N_A — постоянная Авогадро.

С другой стороны, число ионов, осевших на электроде, можно выразить через заряд Q , прошедший через электролит, и заряд одного иона q_0 : $N = \frac{Q}{q_0}$.

Следовательно, $\frac{Q}{q_0} = \frac{m}{M} N_A$, откуда $m = m_0 N = \frac{MQ}{N_A q_0}$.

Заряд любого иона равен заряду одновалентного иона, т. е. заряду электрона e , умноженному на валентность Z иона: $q_0 = eZ$. Таким образом,

$$m = \frac{M}{N_A e Z} Q = \frac{M}{N_A e Z} It. \quad (67.1)$$

Величины N_A и e являются универсальными постоянными, а M и Z постоянны для данного вещества. Поэтому выражение $\frac{M}{N_A e Z}$ — величина, постоянная для данного вещества.

Из формулы (67.1) следует, что масса вещества, выделившегося на электроде, пропорциональна заряду, прошедшему через раствор, или, другими словами, пропорциональна силе

тока и времени. Эта зависимость впервые была экспериментально установлена М. Фарадеем в 30-х гг. XIX в. и носит название *закона Фарадея*.

Если постоянный множитель в формуле (67.1) обозначить через k :

$$k = \frac{M}{N_A e Z}, \quad (67.2)$$

то закон Фарадея можно записать в виде

$$m = kQ = kIt. \quad (67.3)$$

Коэффициент k называется *электрохимическим эквивалентом* данного вещества. Он выражается в килограммах на кулон (кг/Кл).

Определение заряда электрона. Закон Фарадея позволяет определить заряд одновалентного иона, т. е. заряд электрона. Из формулы (67.1) получаем

$$e = \frac{MQ}{mN_A Z} = \frac{Mit}{mN_A Z}.$$

Следовательно, чтобы определить заряд электрона e , необходимо в опыте с электролизом раствора какого-либо электролита, например медного купороса, определить массу выделившейся меди, время процесса и силу тока в цепи. Тогда, зная молярную массу меди и ее валентность, можно вычислить заряд электрона. Опыты, выполненные с различными электролитами, показали, что $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Это и есть наименьший элементарный свободный электрический заряд, существующий в природе. Любой другой электрический заряд состоит из целого числа элементарных зарядов, т. е. кратен модулю заряда электрона.

Технические применения электролиза. Электролиз получил широкое применение в технике. На нем основана *электрометаллургия* — получение щелочных и щелочно-земельных металлов (алюминия, магния, бериллия и др.) путем электролиза расплавленных руд.

Для очистки металлов от примесей, например рафинирования меди, тоже используется явление электролиза.

Медные руды содержат сернистые соединения меди, ее оксиды, а также примеси посторонних металлов (никель, свинец, сурьма, висмут и др.). Для получения меди, очищенной от примесей, медную пластину, выплавленную непосредственно из руды, помещают в качестве анода в раствор сернокислой меди (CuSO_4). Подбирая определенное напряжение на электродах ванны, можно добиться, чтобы на катоде выделялась только чистая металлическая медь. Посторонние примеси при этом на катод не попадают. Они переходят в раствор либо выпадают на дно ванны в виде осадка.

Электролитическим способом извлекают чистые металлы не только из раствора, но и из расплавов ионных кристал-

лов, которые и в твердом состоянии состоят из ионов. Таким образом добывают в настоящее время алюминий. Этот металл получают электрохимическим путем из расплавленных оксидов, содержащих оксид алюминия Al_2O_3 (бокситов). Расплавленные бокситы помещают в ванну, угольные дно и стенки которой служат катодом. Анодом служат угольные стержни, опущенные в ванну. Так как в этом процессе применяют очень сильные токи (в несколько десятков тысяч ампер), то за счет выделяемой током теплоты вещество все время поддерживается в расплавленном состоянии.

На явлении электролиза основаны такие распространенные в технике технологические процессы, как гальваностегия и гальванопластика. Для предохранения металлов от коррозии их поверхность часто покрывают трудно окисляемыми металлами, т. е. производят никелирование или хромирование. Этот процесс называется *гальваностегией*. Гальваностегию также применяют для покрытия ювелирных изделий тончайшими слоями серебра или золота. С этой целью покрываемый слоем другого металла предмет помещают в качестве катода в электролитическую ванну. Анодом служит пластинка металла, которым требуется покрыть предмет, а ванна содержит раствор соли этого металла.

С помощью электролиза можно также изготовить рельефные металлические копии предметов. Этот процесс называется *гальванопластикой*, его изобрел русский ученый Б. С. Якоби в 40-х гг. XIX века.

Для изготовления рельефной копии предмета его покрывают вначале каким-нибудь пластичным материалом (воском) и делают из этого материала слепок. Затем слепок покрывают графитом, чтобы сделать его электропроводным, и помещают в электролитическую ванну, в которой он служит катодом. Анодом и в этом случае является пластинка металла, из которого хотят изготовить рельефную копию, а ванна содержит раствор соли этого металла.

■ Вопросы

1. Чистая вода не проводит электрический ток. Почему она становится проводником при растворении в ней солей, кислот или щелочей? 2. Что называется электрохимическим эквивалентом вещества? 3. Как можно определить заряд электрона?

■ Задачи для самостоятельного решения

67.1. Аэростат объемом 250 м^3 нужно заполнить водородом при температуре 27°C и давлении $2 \cdot 10^5 \text{ Па}$. Какое количество электричества необходимо для этой цели пропустить при электролизе через раствор серной кислоты?

67.2. Никелирование металлического изделия продолжалось 5 ч при силе тока 0,3 А; площадь поверхности 120 см^2 . Никель двухвалентен. Определите толщину слоя никеля. Молярная масса никеля $5,9 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$, его плотность $8,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

§ 68 Электрический ток в газах

Несамостоятельный электрический разряд. Для изучения электропроводности газов укрепим две металлические пластины параллельно друг другу, соединим одну со стержнем, а вторую с корпусом электрометра и сообщим им разноименные заряды. Опыт показывает, что электрометр не разряжается, следовательно, через воздух между пластинами при небольших значениях напряжения электрический ток не проходит. Такой же результат получается при выполнении опыта в любом другом газе.

Внесем в пространство между пластинами пламя спички или спиртовки — электрометр быстро разряжается (рис. 8.12). Такой же результат можно получить, освещая воздух между пластинами электрической дугой. Эти опыты доказывают, что под действием пламени или света газ может стать проводником электрического тока.

Явление протекания электрического тока через газ, наблюдаемое только при условии какого-либо внешнего воздействия на газ, называется *несамостоятельным электрическим разрядом*.

Термическая ионизация. Повышение температуры газа делает его проводником электрического тока, потому что часть нейтральных атомов или молекул газа превращается в ионы. Для отрыва электрона от атома необходимо совершить работу против сил кулоновского притяжения между положительно заряженным ядром и отрицательно заряженным электроном. Процесс отрыва электрона от атома называется ионизацией атома. Минимальная энергия, которую необходимо затратить для отрыва электрона от атома, называется *энергией ионизации*.

Электрон может быть оторван от атома при соударениях с другими атомами, если кинетическая энергия превысит энергию ионизации. Кинетическая энергия теплового движения атомов или молекул прямо пропорциональна абсолютной

температуре, поэтому с повышением температуры газа увеличивается число соударений атомов или молекул, сопровождающихся ионизацией.

Процесс возникновения свободных электронов и положительных ионов в результате столкновений атомов и молекул газа при высокой температуре называется *термической ионизацией*.

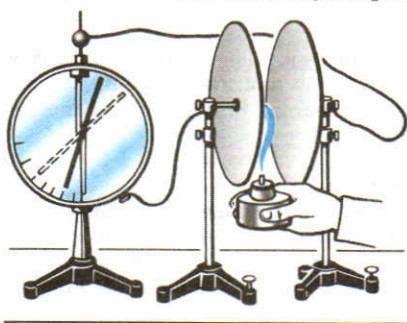


рис. 8.12

Частично или полностью ионизированный газ, в котором плотности положительных и отрицательных зарядов практически одинаковы, называется *плазмой*.

Доля ионизованных атомов в газе очень быстро увеличивается с возрастанием температуры. Например, если при температуре $T = 10\,000\text{ К}$ ионизовано менее 10% общего числа атомов водорода, то при температуре выше $20\,000\text{ К}$ водород практически полностью ионизован. При низких температурах любой газ является изолятором; при высоких температурах он превращается в плазму и становится проводником электрического тока.

Фотоионизация. Энергия, необходимая для отрыва электрона от атома или молекулы, может быть передана светом или невидимым излучением — ультрафиолетовым, рентгеновским. Ионизация атомов или молекул под действием света называется фотоионизацией.

Фотоионизация может превращать газ в плазму и делать его проводником электрического тока.

Ионизация электронным ударом. Ионизация электронным ударом становится возможной тогда, когда электрон на длине свободного пробега λ приобретает кинетическую энергию W_k , достаточную для совершения работы отрыва электрона от атома (A_n): $W_k \geq A_n$, или

$$eE\lambda \geq A_n, \quad (68.1)$$

где E — напряженность электрического поля; λ — длина свободного пробега электрона.

Энергия связи электронов в атомах и молекулах (энергия ионизации) обычно выражается в электрон-вольтах (эВ). Один электрон-вольт равен работе, которую совершает электрическое поле при перемещении электрона или другой частицы, обладающей элементарным зарядом, между точками поля, напряжение между которыми равно 1 В:

$$1\text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19}\text{ Кл} \cdot 1\text{ В} = 1,6 \cdot 10^{-19}\text{ Дж}.$$

Энергия ионизации атома водорода, например, равна 13,6 эВ, молекулы кислорода — 12 эВ, азота — 16 эВ и т. д.

Самостоятельный электрический разряд. Опыт показывает, что если постепенно повышать напряжение между двумя электродами в газе, то можно достигнуть некоторого его значения, зависящего от природы газа и давления, при котором в газе возникает электрический ток и без воздействия внешних ионизаторов. Явление прохождения через газ электрического тока, не зависящего от внешних ионизаторов, называется *самостоятельным разрядом* в газе.

Основной механизм ионизации газа при самостоятельном электрическом разряде — ионизация атомов и молекул ударами электронов.

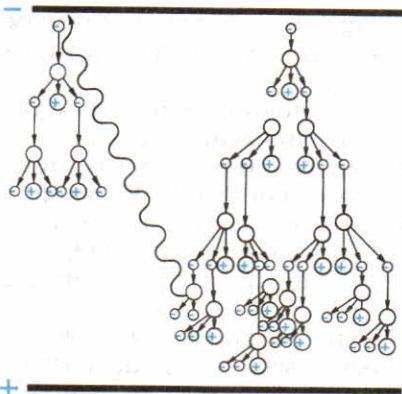


рис. 8.13

Развитие самостоятельного электрического разряда в газе протекает следующим образом. Как только в газе появляется свободный электрон, он под действием электрического поля ускоряется, его кинетическая энергия возрастает, и если выполняется условие $eE\lambda \geq A_n$, то он при соударении с молекулой ионизует ее.

Первичный электрон и вторичный, возникший в результате ударной ионизации, вновь ускоряются под дейст-

вием электрического поля, и каждый из них при следующих соударениях освобождает еще по одному электрону и т. д. Число свободных электронов нарастает лавинообразно до тех пор, пока они не достигнут анода (рис. 8.13).

Положительные ионы, возникающие в газе, движутся под действием электрического поля от анода к катоду. При ударах положительных ионов о катод, а также под действием излучения, возникающего при развитии разряда, с катода могут освобождаться новые электроны. Они разгоняются электрическим полем и создают новые электронно-ионные лавины, и этот процесс может продолжаться непрерывно.

Концентрация ионов в плазме по мере развития разряда увеличивается, и сила тока в цепи при наличии самостоятельного разряда обычно ограничивается лишь внутренним сопротивлением источника тока и электрическим сопротивлением других элементов цепи.

Искровой разряд. Если источник тока не способен поддерживать самостоятельный электрический разряд в течение длительного времени, то наблюдается форма самостоятельного разряда, называемая *искровым* разрядом. Искровой разряд прекращается через короткий промежуток времени после начала разряда в результате значительного уменьшения напряжения. Примеры искрового разряда — искры, возникающие при расчесывании волос, разделении листов бумаги, разряде конденсатора.

Самые большие «искры» — молнии — наблюдаются во время гроз. Исследования показали, что причиной возникновения гроз является разделение электрических зарядов в грозовых облаках. При дроблении водяных капель и кристаллов льда крупные капли и кристаллы приобретают избыточный отрицательный заряд, а мелкие — положительный. Восходящие потоки воздуха в грозовом облаке подни-

мают мелкие капли и кристаллы к вершине облака, крупные капли и кристаллы падают к его основанию. Отрицательный заряд основания облака наводит положительный заряд на проводящей земной поверхности (рис. 8.14). Разность потенциалов между основанием облака на высоте 3—4 км и поверхностью Земли достигает 20—100 млн вольт. Молния переносит из облака 20—30 Кл отрицательного электрического заряда, сила тока в молнии достигает 10—20 кА, длительность импульса тока в канале молнии несколько десятков микросекунд. Самостоятельный электрический разряд между газовым облаком и Землей через некоторое время сам собою прекращается, так как большая часть избыточных электрических зарядов в грозовом облаке нейтрализуется электрическим током, протекающим по плазменному каналу молнии.

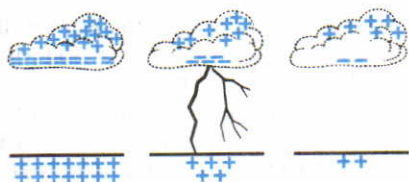


рис. 8.14

При нарастании силы тока в канале молнии происходит нагревание плазмы до температуры свыше 10^4 К. Изменения давления в плазменном канале молнии при нарастании силы тока и прекращении разряда вызывают звуковые явления, называемые громом.

На Земле каждые сутки происходит около 300 гроз, среднее значение силы тока «грозовой машины», сообщаемой Земле отрицательный электрический заряд, составляет около 1800 А. Отрицательный заряд Земли около $6 \cdot 10^5$ Кл, напряженность электрического поля у поверхности Земли составляет примерно 100 В/м.

Между отрицательно заряженной Землей и положительно заряженными верхними слоями атмосферы напряжение достигает примерно 40 кВ. В атмосферном воздухе всегда содержится небольшое количество ионов. Электрический ток, создаваемый этими ионами, разряжает Землю, но «грозовая машина» пополняет этот заряд с каждым ударом молнии. Если бы грозы прекратились по всей Земле, то электрический заряд был бы нейтрализован током ионов в атмосферном воздухе примерно за полчаса. Молнии возникают не только в водяных облаках, но и в облаках пыли и газов, образуящихся при извержениях вулканов.

Коронный разряд. В сильно неоднородных электрических полях, образующихся, например, между острием и плоскостью или между проводом линии электропередачи и поверхностью Земли, возникает особая форма самостоятельного разряда в газах, называемая *коронным разрядом*.

Основная особенность коронного разряда заключается в том, что процесс ионизации атомов электронным ударом

происходит лишь на небольших расстояниях от одного из электродов в области с высокими значениями напряженности электрического поля.

С коронным разрядом приходится считаться при передаче электроэнергии на большие расстояния. Наибольшая напряженность поля создается около проводов. Так как электроэнергия на большие расстояния передается по сравнительно тонким проводам при высоком напряжении между ними, то около проводов происходит довольно интенсивный коронный разряд. Это ведет к потере части передаваемой электроэнергии. Потери на коронный разряд в таких линиях тем больше, чем выше напряжение между проводами и чем больше протяженность линии.

Поскольку для уменьшения тепловых потерь в линиях электропередачи необходимо повышать напряжение между проводами, уменьшение потерь на коронный разряд должно проводиться не за счет снижения напряжения ЛЭП. Это можно было бы сделать путем увеличения толщины проводов и тем самым уменьшения напряженности поля около них. Но значительное увеличение толщины проводов практически невозможно. Например, при увеличении диаметра проводов в 10 раз площадь их сечения, а следовательно, и масса проводов увеличилась бы в 100 раз! Во сколько же раз было бы необходимо увеличивать прочность мачт опоры проводов и изоляторов, а также расход цветных металлов — меди или алюминия?

Для снижения потерь на коронный разряд провода ЛЭП делают не одиночными, а каждый провод расщепляют на несколько частей (проводов). Например, для ЛЭП с напряжением 500 кВ каждый провод расщепляют на три части. С помощью распорок между составными частями провода обеспечивают такое их расположение, чтобы сечения проводов вдоль линии располагались в вершинах равностороннего треугольника. Расположенные таким образом три части провода представляют собой как бы один пустотелый провод, но значительно большего радиуса кривизны. Для ЛЭП, рассчитанной на 750 кВ, каждый провод составляют из четырех частей.

Коронный разряд может быть успешно использован в электрофильтрах многих производств, где необходимо очищать газы, выходящие из топок, от твердых и жидких примесей. Это дает возможность извлекать из газов ценные продукты, которые раньше уходили в атмосферу и загрязняли ее.

Дуговой разряд. Известна еще одна важная форма самостоятельного разряда в газах, получившая название *электрической дуги*. Она была впервые открыта профессором физики Петербургской медико-хирургической академии В. В. Петровым в 1802 г. Слегка раздвинув на небольшое рас-

стояние два соприкасающихся угольных электрода, присоединенных к источнику тока, мы увидим между концами углей яркое свечение газа, а сами угли при этом раскаляются.

Рассматривая дуговой разряд через темное стекло, можно заметить, что свет исходит преимущественно от концов углей. Свечение самой дуги — яркой изогнутой полосы, образующейся в газовом промежутке между концами углей, — значительно слабее. Температура углей очень высока. Наиболее горячим является углубление, образующееся на аноде, которое называется кратером. Его температура при атмосферном давлении достигает 4000°C .

Для горения дуги достаточно сравнительно небольшого напряжения 40—50 В, но сила тока в дуге достигает десятков и даже сотен ампер. Это указывает на то, что сопротивление газа в дуговом разряде сравнительно мало.

Какие частицы служат носителями зарядов в дуге? Когда угольные электроды приводят в контакт, они соприкасаются в отдельных небольших участках малого сечения. Поэтому сопротивление этих участков велико, и они сильно разогреваются. Когда угли раздвигают, электроны, испускаемые раскаленными участками катода, ионизуют воздух и обеспечивают большую концентрацию заряженных частиц в дуге.

Дуговой разряд находит важные технические применения. Впервые дуга применена русским инженером П. Н. Яблочковым для освещения (1876). Вследствие высокой температуры дуга широко используется для сварки и резания металлов. Такой способ сварки впервые был разработан русскими изобретателями Н. И. Бенардосом (1885) и Н. Г. Славыновым (1890).

В настоящее время электрическую дугу применяют в промышленных электропечах для плавки стали. Дуга в этих печах образуется между самим расплавленным металлом и угольными электродами, которые приводят с ним в соприкосновение, а затем разводят. Сила тока в такой дуге достигает десятков тысяч ампер.

Тлеющий разряд. До сих пор мы рассматривали самостоятельный разряд в газах при атмосферном давлении. Для такого разряда необходима большая напряженность электрического поля. Однако в разреженном газе самостоятельный разряд может возникнуть в электрическом поле значительно меньшей напряженности.

Это можно обнаружить при помощи опыта, используя стеклянную трубку с двумя металлическими электродами и патрубком, присоединенным к вакуумному насосу (рис. 8.15). Присоединим электроды к источнику высокого напряжения. Мы обнаружим, что при атмосферном давлении тока в цепи нет (или он очень мал). Но если при помощи насоса начать

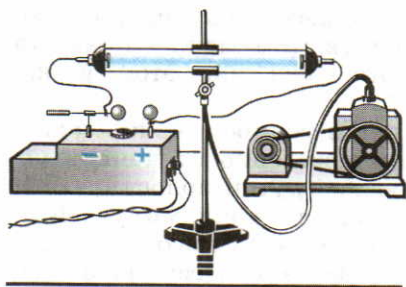


рис. 8.15



рис. 8.16

откачивать газ из трубки, в ней возникает разряд, сопровождающийся свечением газа. В разреженном газе электроны реже сталкиваются с атомами, длина свободного пробега электрона возрастает, и за время между столкновениями он успевает приобрести достаточную для ионизации энергию в электрическом поле с меньшей напряженностью. За счет электронно-ионной лавины в газе возникает разряд. Между электродами трубки образуется светящийся жгут. Если трубка заполнена воздухом, то светящийся жгут имеет малиновый цвет.

По мере дальнейшего уменьшения давления канал разряда расширяется и заполняет почти все сечение трубки, а около катода образуется темное пространство. Разряд, возникающий при пониженном давлении, называется тлеющим разрядом.

При давлении 300—500 Па видны две основные области тлеющего разряда: катодное темное пространство и светящийся столб у анода (рис. 8.16). Цвет свечения зависит от природы газа.

Свечение при тлеющем разряде нашло широкое применение в осветительной технике. Для рекламы, например, используются различные газосветные трубки. Широко распространены лампы дневного света. Электрический разряд в них происходит в парах ртути. При этом возникает ультрафиолетовое излучение, которое поглощается слоем специального вещества, покрывающего изнутри стенки лампы, и вызывает его свечение. Излучение этого вещества близко к дневному свету. Лампы дневного света более долговечны и потребляют меньше электрической энергии, чем лампы накаливания.

■ Вопросы

1. Опишите опыт, в котором обнаруживается несамостоятельный электрический разряд в воздухе. 2. Что такое термическая ионизация? 3. Что называется плазмой? 4. Какие причины могут вызывать несамостоятельный электрический разряд? 5. Чем отличается самостоятельный электрический разряд в газе от несамостоятельного разряда? 6. При каких условиях возни-

кает самостоятельный электрический разряд в газе? 7. Каков механизм развития самостоятельного электрического разряда? 8. Почему электрический разряд между грозовым облаком и Землей происходит за очень короткое время? 9. Каковы характерные признаки дугового электрического разряда? 10. При каких условиях возникает коронный разряд?

§ 69 Электрический ток в вакууме

Электронная эмиссия. Если два электрода поместить в герметичный сосуд и удалить из сосуда воздух, то, как показывает опыт, электрический ток в вакууме не возникает. Причина заключается в том, что в вакууме нет заряженных частиц, способных переносить электрические заряды от одного электрода к другому. Заряженные частицы — электроны и положительно заряженные ионы — есть в каждом из электродов, но они не могут выйти в вакуум, так как удерживаются силами кулоновского притяжения.

Для освобождения электрона с поверхности твердого тела нужно совершить работу против сил электростатического притяжения, действующих на отрицательный электрон со стороны положительно заряженных атомных ядер. Работа, которую нужно совершить для освобождения электрона с поверхности тела, называется работой выхода. Работа выхода обычно выражается в электрон-вольтах и для большинства металлов лежит в пределах от 2 до 6 эВ. Например, для цезия она равна 1,8 эВ, для серебра 4 эВ, для никеля 4,9 эВ.

Американский ученый и изобретатель Т. А. Эдисон в 1879 г. обнаружил, что в вакуумной стеклянной колбе может возникнуть электрический ток, если один из находящихся в ней электродов нагреть до высокой температуры.

Для исследования природы электрического тока, возникающего в вакууме при нагревании одного из электродов, поставим следующие опыты. Пусть в стеклянном баллоне находятся два электрода, один из которых представляет собой металлический диск, второй — тонкую металлическую проволоку, свернутую в спираль. Концы спирали укреплены на металлических стержнях, имеющих два выхода для подключения в электрическую цепь. Соединив концы спирали с источником тока, можно нагреть ее до высокой температуры.

Опыт показывает, что если соединить стержень заряженного электрометра с диском, а корпус — с холодной проволоочной спиралью, то электрометр не разряжается ни при положительном, ни при отрицательном заряде на стержне (рис. 8.17).

Подключим источник тока к выводам проволоочной спирали. Теперь электрометр быстро разряжается при положительном потенциале стержня, при отрицательном потенциале стержня электрометр по-прежнему не разряжается.

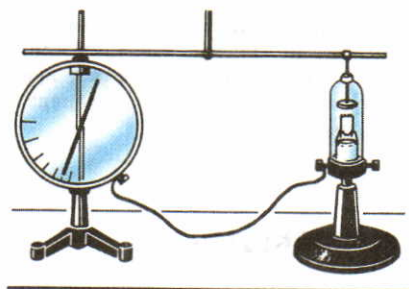


рис. 8.17

Эти опыты показывают, что нагретая спираль испускает частицы, обладающие отрицательным электрическим зарядом. Изучение свойств частиц, испускаемых нагретыми телами, показало, что это электроны. Явление испускания свободных электронов с поверхности нагретых тел называется *термоэлектронной эмиссией*.

Явление термоэлектронной эмиссии объясняется тем, что при повышении температуры тела увеличивается кинетическая энергия некоторой части электронов в веществе. Если кинетическая энергия электрона превысит работу выхода, то он может преодолеть действие сил притяжения со стороны положительных ионов и выйти с поверхности тела в вакуум.

Термоэлектронная эмиссия напоминает процесс испарения жидкости или твердого тела с той разницей, что с нагретого металла «испаряются» электроны, а из жидкости — нейтральные молекулы.

На явлении термоэлектронной эмиссии основана работа различных электровакуумных приборов.

Электронно-лучевая трубка. Прибор, в котором используется пучок электронов, свободно летящих в пространстве за анодом, называется электронно-лучевой трубкой (рис. 8.18). Источником электронов в электронно-лучевой трубке служит катод 2, нагреваемый нитью накала 1. Электроны разгоняются электрическим полем между катодом и двумя анодами 4 и 5. Изменяя напряжение на аноде 4, можно фокусировать электронный пучок 8, т. е. изменять площадь поперечного сечения электронного пучка на экране. Изменяя напряжение между катодом 2 и управляющим электродом 3, можно из-

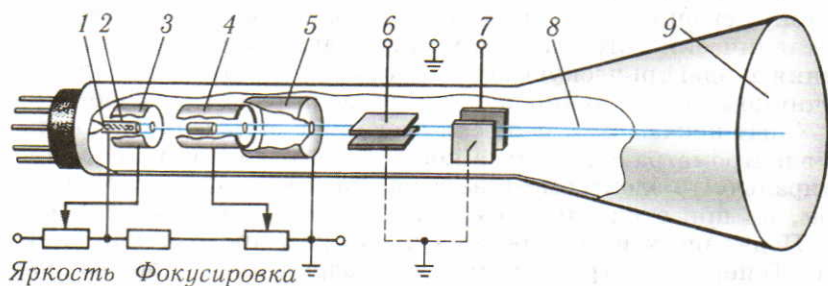


рис. 8.18

менять интенсивность электронного пучка (яркость пятна на экране).

Внутренняя поверхность стеклянного баллона электронно-лучевой трубки напротив анода, покрытая тонким слоем кристаллов, является экраном 9. Поток электронов, пролетевших через отверстие в аноде электронно-лучевой трубки, — электронный пучок — вызывает свечение кристаллов, и сквозь стекло экрана видно светящееся пятно в месте падения электронов на экран.

С помощью электрических или магнитных полей можно управлять движением электронов на их пути и заставить электронный пучок «рисовать» любую картину на экране.

Это используется для создания изображений на экране электронно-лучевой трубки телевизора, называемой *кинескопом*. В кинескопе управление электронным пучком осуществляется с помощью переменного магнитного поля, создаваемого двумя катушками, надетыми на горловину трубки.

В трубке электронно-лучевого осциллографа между анодом и экраном находятся две пары параллельных металлических пластин 6 и 7. Эти пластины называются управляющими электродами. Одна пара пластин расположена вертикально, а другая — горизонтально. Если подать напряжение на вертикально расположенные пластины, то электронный пучок будет отклоняться в горизонтальном направлении, подача напряжения на горизонтальные пластины вызывает вертикальное смещение пучка. Смещение пятна на экране трубки пропорционально приложенному напряжению, поэтому электронный осциллограф может использоваться в качестве электроизмерительного прибора.

Для исследования быстро переменных электрических процессов в осциллографе осуществляется развертка — равномерное перемещение электронного пучка по горизонтали с быстрым отбросом назад. Для того чтобы пучок перемещался вдоль горизонтальной оси с постоянной скоростью, напряжение на вертикально отклоняющих пластинах должно изменяться линейно по времени, а для быстрого возвращения пучка в исходное положение напряжение должно очень быстро падать до нуля. Такое напряжение носит название пилообразного (рис. 8.19).

С помощью специальных преобразователей изменения любой физической величины можно преобразовать в изменение напряжения и затем исследовать с помощью осциллографа. Например, присоединив выводы микрофона

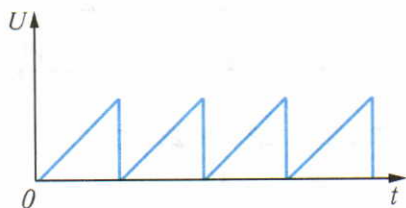


рис. 8.19

ко входу электронного осциллографа, можно исследовать звуковые колебания.

■ Вопросы

1. Можно ли создать электрический ток в вакууме? 2. Что препятствует выходу электронов с поверхности тел? 3. Что называется работой выхода? 4. Как устроена электронно-лучевая трубка? 5. Каким образом осуществляется управление яркостью электронного пучка? 6. Каким образом осуществляется равномерное движение пучка по экрану при включении развертки? 7. Почему для осуществления развертки применяется напряжение пилообразной формы?

■ ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1. Рассчитайте, с какой скоростью электроны достигают анода, если напряжение между анодом и катодом лампы равно 100 В.

Решение. Если пренебречь начальной скоростью электронов, вылетающих из катода ($v_0=0$), то приобретенная ими кинетическая энергия $\frac{mv^2}{2}$ равна работе eU , которая совершается при перемещении электронов в электрическом поле: $\frac{mv^2}{2}=eU$.

$$\text{Отсюда } v = \sqrt{\frac{2eU}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 100 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{9,1 \cdot 10^{-31}}} \text{ м/с} = 5,9 \cdot 10^6 \text{ м/с.}$$

Задача 2. Электрон влетает в плоский конденсатор со скоростью $4 \cdot 10^7$ м/с параллельно его пластинам. Под действием электрического поля электрон смещается от первоначального направления на 2 мм. Длина конденсатора 6 см, расстояние между его пластинами 0,5 см. Найдите напряжение между пластинами конденсатора. Масса электрона $9,1 \cdot 10^{-31}$ кг, заряд $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Решение. При движении электрона в конденсаторе его абсцисса изменяется по закону равномерного движения $x=vt$, так как в направлении оси OX сила не действует (рис. 8.20), ордината же изменяется по закону равноускоренного движения $y=at^2/2$ благодаря действию в этом направлении электрической силы. В момент вылета электрона из конденсатора его координаты соответственно равны: $x=l$ и $y=h$. Учитывая это, можно записать:

$$l=vt, \quad h=at^2/2.$$

Исключив время из этих уравнений, получаем

$$h = \frac{at^2}{2v^2}. \quad (1)$$

Ускорение можно определить из второго закона Ньютона $a = \frac{F}{m}$, где

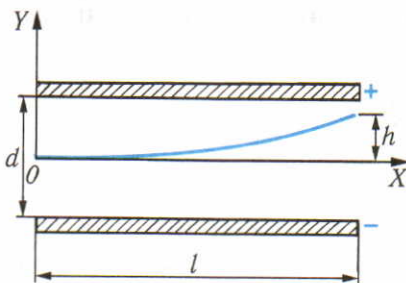


рис. 8.20

$F = eE$. Следовательно, $a = \frac{eE}{m}$. Так как $E = \frac{U}{d}$, то $a = \frac{eU}{md}$. Отсюда $U = \frac{amd}{e}$.

Заменяя здесь a его значением из выражения (1), окончательно для напряжения будем иметь:

$$U = \frac{2v^2 h m d}{l^2 e} = \frac{2 \cdot 16 \cdot 10^{14} \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 0,5 \cdot 10^{-2}}{36 \cdot 10^{-4} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} \text{ В} \approx 50 \text{ В}.$$

■ Задачи для самостоятельного решения

69.1. Определите скорость электронов в электронно-лучевой трубке, если анодное напряжение равно 8 кВ.

69.2. В поле, созданное пластинами вертикального отклонения электронного пучка, влетает электрон. Вектор скорости электрона направлен параллельно пластинам. Длина пластин 2 см, расстояние между ними 1 см. Какова скорость электрона, если за время движения в поле он отклоняется на 1 мм? Напряжение между пластинами равно 30 В.

§ 70 Электрон

Открытие электрона. Определение заряда одновалентного иона (см. § 67) не может служить строгим доказательством, что в природе существуют элементарные электрические заряды. Можно, например, предположить, что все одновалентные ионы имеют различные электрические заряды, но их среднее значение равно элементарному заряду e .

Для того чтобы выяснить, существует ли в природе элементарный заряд, необходимо было измерить не суммарное количество электричества, переносимое большим числом ионов, а заряды отдельных ионов. Неясным был и вопрос о том, обязательно ли электрический заряд связан с частицами вещества, и если связан, то с какими именно.

Важный вклад в решение этих вопросов был сделан в конце XIX в. при исследовании явлений, связанных с электрическим током в разреженных газах. В этих опытах было обнаружено свечение стекла разрядной трубки за анодом. На светлом фоне светящегося стекла была видна тень от анода, как будто бы свечение стекла вызывалось каким-то невидимым излучением, распространяющимся прямолинейно от катода к аноду (рис. 8.21). Это невидимое излучение называли *катодными лучами*. В 1895 г.

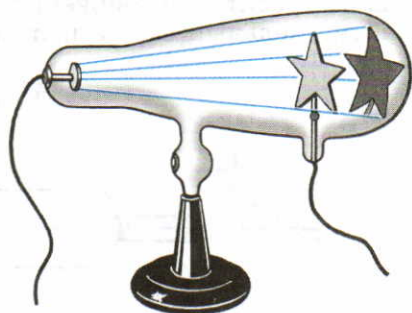


рис. 8.21

Ж. Перреном было установлено, что катодные лучи в действительности являются потоком отрицательно заряженных частиц.

Английский физик Дж. Дж. Томсон в 1897 г. выполнил опыты по отклонению электронов в электрическом и магнитном полях. Направляя пучок катодных лучей перпендикулярно вектору $\vec{B}$ индукции однородного магнитного поля, он измерил радиус окружности, по которой двигались катодные лучи. Если катодные лучи представляют собой поток заряженных частиц, каждая из которых обладает электрическим зарядом e и массой m , то при их движении в магнитном поле выполняется условие:

$$evB = \frac{mv^2}{r}.$$

Отсюда отношение заряда e частицы к ее массе m равно:

$$e/m = v/(Br). \quad (70.1)$$

Для определения скорости движения частиц Томсон выполнил второй опыт. В этом опыте на катодные лучи, кроме магнитного поля с индукцией $\vec{B}$, действовало электрическое поле (рис. 8.22). Напряженность $\vec{E}$ поля подбиралась такой, чтобы при противоположных направлениях векторов магнитной силы $\vec{F}_m$ и электрической силы $\vec{F}_e$ их действие на частицы катодных лучей компенсировалось и пучок катодных лучей не отклонялся. При равенстве модулей сил ($F_e = F_m$) выполняется условие:

$$eE = evB, \quad (70.2)$$

из которого можно определить скорость v частиц по известным значениям индукции магнитного поля и напряженности электрического поля: $v = E/B$. Подставив выражение для скорости в уравнение (70.1), мы сможем выразить отношение заряда частицы к ее массе через напряженность электрического поля, индукцию магнитного поля и радиус кривизны траектории движения частиц в магнитном поле, т. е. найти удельный заряд частицы:

$$\frac{e}{m} = \frac{E}{B^2 r}. \quad (70.3)$$

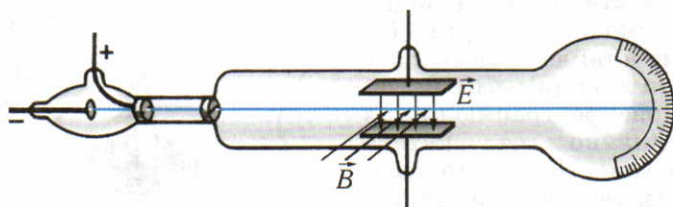


рис. 8.22

В опытах Дж. Дж. Томсона было установлено, что отношение электрического заряда каждой из частиц катодных лучей к ее массе является величиной, одинаковой для всех частиц. Если предположить, что каждая частица катодных лучей имеет заряд, равный элементарному заряду e , то приходится сделать вывод, что масса частицы катодных лучей примерно в 1870 раз меньше массы самого легкого из известных атомов — атома водорода.

Далее Дж. Дж. Томсон установил, что отношение заряда частицы катодных лучей к ее массе получается одинаковым при наполнении трубки различными газами и при изготовлении катода из различных металлов. Следовательно, в состав атомов различных элементов входили одинаковые частицы.

На основании результатов своих опытов Дж. Дж. Томсон сделал вывод о делимости атомов вещества. Из атома любого химического элемента могут быть вырваны отрицательно заряженные частицы массой, меньшей одной тысячной массы атома водорода. Все эти частицы имеют одинаковую массу и обладают одинаковыми электрическими зарядами. Эти частицы теперь называются *электронами*.

По современным измерениям, удельный заряд электрона равен:

$$e/m = 1,7588 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг.}$$

Опыт Милликена. Существование элементарного электрического заряда окончательно было доказано в опытах, которые выполнил в 1909—1912 гг. американский физик Р. Милликен. В этих опытах измерялась скорость движения капель масла в однородном электрическом поле между двумя металлическими пластинками. Капля масла, не имеющая электрического заряда, из-за сопротивления воздуха падает с некоторой постоянной скоростью. Если на своем пути капля встречается с ионом и приобретает электрический заряд q , то на нее, кроме силы тяжести и силы сопротивления воздуха, действует еще кулоновская сила $\vec{F}_e$, со стороны электрического поля. В результате изменения силы, действующей на каплю, изменяется скорость движения. Измеряя скорость движения капли и зная напряженность электрического поля, в котором происходило ее движение, Милликен мог определить заряд капли.

Опыт Милликена был повторен в 1913 г. А. Ф. Иоффе. В этих опытах вместо капель масла использовались металлические пылинки. Изменением напряжения между пластинами достигалось условие равенства кулоновской силы и силы тяжести, и пылинка в этом случае оставалась неподвижной между пластинами конденсатора. Из равенства силы тяжести и электрической силы следует:

$$mg = q_1 E_1.$$

При воздействии на пылинку рентгеновским излучением ее заряд изменялся, и для уравнивания силы тяжести нужно было изменить напряженность электрического поля между пластинами:

$$mg = q_2 E_2.$$

По измеренным значениям на напряженности электрического поля можно было определить отношение электрических зарядов пылинки:

$$mg = q_1 E_1 = q_2 E_2 = \dots = q_n E_n;$$

$$\frac{q_2}{q_1} = \frac{E_1}{E_2}, \quad \frac{q_3}{q_1} = \frac{E_1}{E_3}, \quad \dots, \quad \frac{q_n}{q_1} = \frac{E_1}{E_n}.$$

Опыты Милликена и Иоффе показали, что заряды капель и пылинок всегда изменяются скачкообразно, кратно заряду электрона. Минимальная «порция» электрического заряда — это элементарный электрический заряд, равный:

$$e = 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}$$

Электрический заряд любого тела всегда целочисленно кратен элементарному электрическому заряду. Меньших «порций» электрического заряда, способных переходить от одного тела к другому, в природе нет. Зная заряд электрона и его удельный заряд, можно вычислить массу электрона:

$$m = 9,1095 \cdot 10^{-31} \text{ кг.}$$

■ Вопросы

1. Как был открыт электрон? 2. На каком основании можно предположить, что масса электрона значительно меньше массы атома водорода? 3. Из каких опытов следует, что в состав атомов всех элементов входят одинаковые электроны? 4. Что было доказано опытами Милликена и Иоффе?

§ 71 Электрический ток в полупроводниках

Полупроводники. Многие вещества в кристаллическом состоянии не являются такими хорошими проводниками электрического тока, как металлы, но их нельзя отнести и к диэлектрикам, так как они не являются хорошими изоляторами. Такие вещества долгое время не привлекали особого внимания ученых и инженеров. Одним из первых начал систематические исследования физических свойств таких веществ, называемых сегодня полупроводниками, А. Ф. Иоффе.

Удельное сопротивление типичных проводников имеет значение $10^{-8} - 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, диэлектриков — $10^{10} - 10^{16} \text{ Ом} \cdot \text{м}$,

а удельное сопротивление полупроводников при комнатной температуре находится в широком интервале от 10^{-3} до 10^7 Ом·м.

К полупроводникам относится огромное большинство веществ, масса которых составляет $4/5$ массы земной коры. Это ряд элементов (германий, кремний, селен и др.), множество минералов, различные оксиды, сульфиды, теллуриды и другие химические соединения. Полупроводники оказались не просто «плохими проводниками», а особым классом кристаллов со многими замечательными физическими свойствами.

Зависимость сопротивления полупроводников от внешних условий. Наиболее характерным свойством полупроводников является то, что их удельное сопротивление резко изменяется под влиянием некоторых внешних воздействий. Включим, например, германиевый кристалл *1* при комнатной температуре в цепь, содержащую источник тока и гальванометр (рис. 8.23). Мы увидим, что стрелка гальванометра отклоняется незначительно, т. е. сила тока в цепи мала. Значит, полупроводник при комнатной температуре имеет большое электрическое сопротивление.

Нагревая полупроводник, мы заметим, что стрелка гальванометра отклоняется на больший угол, следовательно, при нагревании удельное сопротивление полупроводника уменьшается. Если же охладить полупроводник, например опустив в стакан с холодной водой, то его сопротивление увеличится. При очень низких температурах удельное электрическое сопротивление многих полупроводников становится таким же большим, как и у диэлектриков.

На рисунке 8.24 изображен график зависимости удельного сопротивления полупроводника от температуры (кривая *1*).

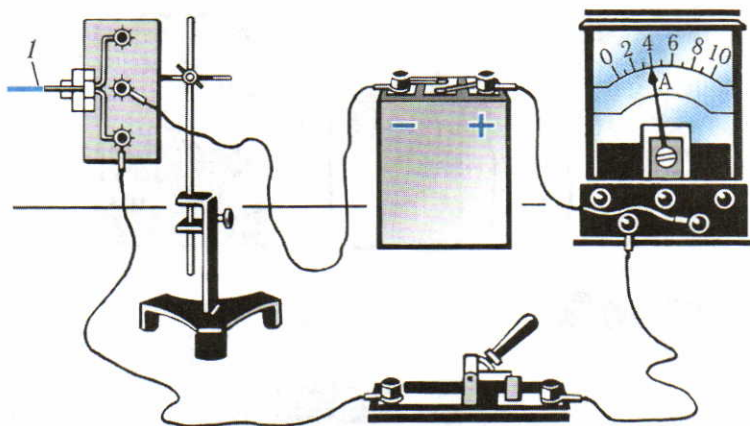


рис. 8.23

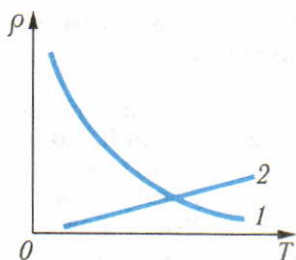


рис. 8.24

Для сравнения на том же рисунке дан график 2 этой зависимости для металлического проводника. Как видно из графиков, сопротивление полупроводников, в отличие от металлов, уменьшается с ростом температуры. И это изменение сопротивления с изменением температуры происходит более резко, чем у металлов.

Из полупроводниковых материалов, удельное сопротивление которых особенно резко изменяется с изменением температуры, изготовляют *терморезисторы*. Ими пользуются для измерения температуры, а также как чувствительными элементами (датчиками), реагирующими на изменения температуры в автоматических устройствах.

Сопротивление полупроводников уменьшается под действием освещения, причем у некоторых весьма значительно. Это явление получило название фотопроводимости. Из таких полупроводников делают *фоторезисторы*, применяемые для управления током в цепи за счет изменения освещения.

Заменим терморезистор в описанном выше опыте фоторезистором 1 (рис. 8.25), который в начале опыта закрыт непрозрачным экраном. Убрав экран, по отклонению стрелки мы убедимся, что освещение вызывает значительное уменьшение сопротивления фоторезистора.

Итак, удельное сопротивление полупроводников резко уменьшается при их нагревании или освещении. Это позволяет использовать полупроводники в различных автоматических устройствах.

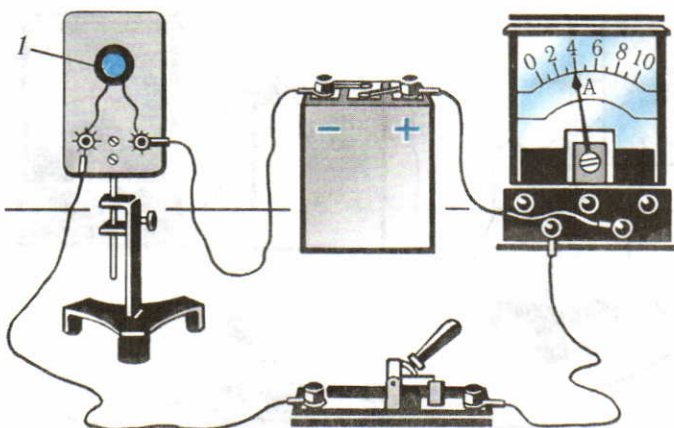


рис. 8.25

Рассмотрим, например, как работает простейшее полупроводниковое термореле, схема которого приведена на рисунке 8.26. Это реле может быть использовано, в частности, для сигнализации о том, что в помещении с электронагревателем достигнута заданная температура.

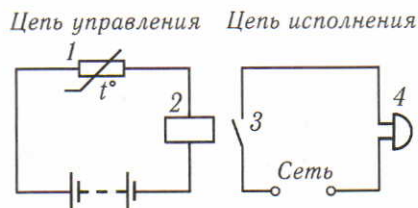


рис. 8.26

Когда температура в помещении, в котором находится терморезистор 1, низка, в цепи течет электрический ток, недостаточный для срабатывания электромагнитного реле 2. Когда температура в помещении достигает необходимого значения, сила тока в цепи возрастает до такого значения, при котором реле срабатывает. При этом замыкаются контакты 3, включающие цепь исполнения, содержащую сигнализатор, — звонок 4.

Природа электрического тока в полупроводниках. Экспериментально установлено, что электрический ток в полупроводниках не сопровождается переносом вещества — никаких химических изменений с ними не происходит. Отсюда следует, что носителями тока в полупроводниках, как и в металлах, являются электроны. Однако между полупроводниками и металлами имеются и глубокие различия. В чем же причина различия свойств полупроводников и металлов?

Мы уже говорили о том, что у металлов имеются электроны, которые сравнительно слабо связаны с атомами. Это валентные электроны, которые находятся на внешних электронных оболочках. Валентные электроны металлов легко отделяются от атомов и образуют электронный газ, концентрация которого очень велика. Эти электроны (электроны проводимости) принадлежат всей кристаллической решетке и, подобно молекулам в обычном газе, свободно перемещаются между ионами по всему проводнику. Именно с этим связана высокая проводимость металлов.

В полупроводниках валентные электроны значительно сильнее связаны с атомами. Поэтому концентрация электронов проводимости при комнатной температуре в полупроводниках незначительна — она в миллиарды раз меньше, чем у металлов, и удельное сопротивление полупроводников при низкой температуре велико, оно близко к удельному сопротивлению диэлектриков. Почему же оно уменьшается при нагревании полупроводников? Чтобы ответить на этот вопрос, рассмотрим схему строения какого-либо типичного полупроводника, например кремния (рис. 8.27).

Собственная проводимость. Атом кремния четырехвалентен. В кристалле кремния каждый атом окружен четырьмя такими же атомами, с которыми его связывают четыре

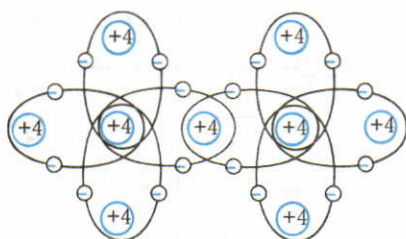


рис. 8.27

Такое взаимодействие между атомами посредством электронных пар называется *ковалентной связью*. Для удобства изобразим плоскую схему кристаллической решетки кремния, в которой валентные электроны показаны в виде точек на прямых отрезках, соединяющих соседние атомы (рис. 8.28). При низких температурах практически все валентные электроны прочно связаны с атомами и поэтому не могут быть электронами проводимости. Но при внешнем воздействии на кристалл — освещении его или нагревании — некоторые электроны приобретают энергию, достаточную для разрыва ковалентных связей. Такие электроны становятся свободными — электронами проводимости.

У того атома, от которого внешним воздействием электрон был переведен в свободное состояние, появилось вакантное место с недостающим электроном (рис. 8.29). Его называют «дыркой». «Дырка» ведет себя как положительно заряженная частица. Какой-либо из электронов соседних атомов может занять вакантное место, тогда «дырка» образуется в соседнем атоме. Такой процесс происходит многократно. Поэтому «дырка» блуждает по кристаллу.

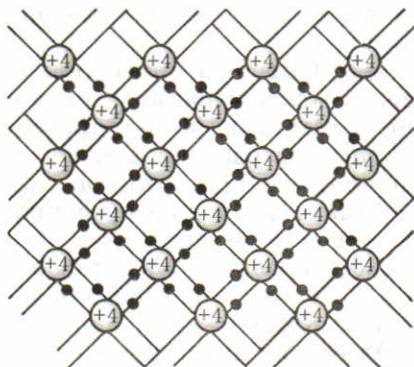


рис. 8.28

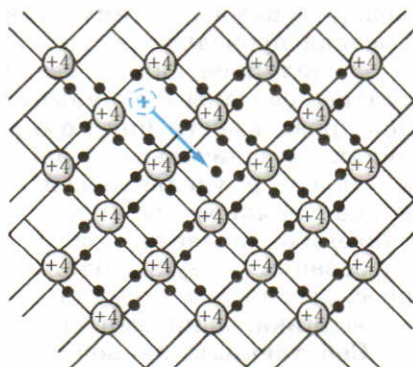


рис. 8.29

При создании в полупроводнике электрического поля «дырки» движутся преимущественно в том направлении, куда двигались бы положительные заряды, а электроны — в противоположном направлении. Не следует забывать, что, говоря о движении «дырок», имеют в виду происходящее в действительности коллективное (эстафетное) перемещение от одного атома к другому электронов, но не свободных, а тех, которые осуществляют ковалентную связь. Проводимость, обусловленная движением свободных электронов и «дырок» в чистом полупроводниковом кристалле (без примесей), называется *собственной проводимостью* полупроводников.

При повышении температуры полупроводника число электронов проводимости, следовательно, и число «дырок» резко возрастает. Этим и объясняется уменьшение сопротивления полупроводника с повышением температуры.

К полупроводникам относят кристаллы, в которых для освобождения электрона требуется энергия не более 1,5—2 эВ. Кристаллы с большими значениями энергии связи электронов с атомами относят к диэлектрикам.

Донорные и акцепторные примеси. Свойства полупроводников сильно зависят от содержания примесей. Проводимость, обусловленная наличием примесей в полупроводнике, называется *примесной проводимостью*.

Пусть, например, в кристалле кремния имеется примесь пятивалентных атомов мышьяка, которые замещают в узлах кристаллической решетки атомы кремния. Пятивалентный атом мышьяка вступает в ковалентные связи с четырьмя атомами кремния, а его пятый электрон оказывается незанятым в связях (рис. 8.30).

Энергия, необходимая для разрыва связи пятого валентного электрона с атомом мышьяка в кристалле кремния, значительно меньше энергии, необходимой для отрыва электрона от атома кремния. Поэтому при комнатной температуре значительная часть атомов мышьяка лишается одного из своих электронов и они становятся положительными ионами.

Положительный ион мышьяка не может захватить электрон у одного из соседних атомов кремния, так как энергия связи электронов с атомами кремния значительно превышает энергию связи

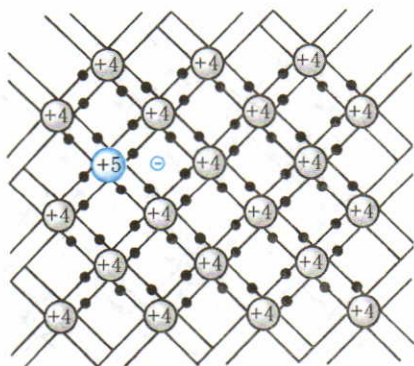


рис. 8.30

пятого валентного электрона с атомом мышьяка. Поэтому эстафетного перемещения электронной вакансии не происходит, дырочной проводимости нет. Примеси, поставляющие электроны проводимости без возникновения равного им количества «дырок», называются *донорными* (от лат. *donare* — давать, жертвовать).

В полупроводниковом кристалле, содержащем донорные примеси, электроны являются основными, но не единственными носителями тока, так как небольшая часть собственных атомов полупроводникового кристалла ионизована и в кристалле имеется небольшое количество «дырок». Полупроводниковые кристаллы, в которых электроны служат основными носителями заряда, а «дырки» — неосновными, называются *электронными* полупроводниками или полупроводниками *n*-типа (от лат. *negativus* — отрицательный).

При введении в кристалл кремния небольшой примеси трехвалентного элемента, например индия, часть атомов кремния замещается этими атомами. Атом индия может осуществлять связь только с тремя соседними атомами, а связь с четвертым атомом кремния оказывается незавершенной (рис. 8.31). Атом индия захватывает электрон у одного из соседних атомов кремния и становится неподвижным отрицательным ионом. Захват электрона от одного из атомов кремния приводит к возникновению «дырки». Примеси, захватывающие электроны и создающие тем самым подвижные «дырки», не увеличивая при этом числа электронов проводимости, называют *акцепторными* (от лат. *acceptor* — приемщик).

При низких температурах основными носителями тока в полупроводниковом кристалле с акцепторной примесью являются «дырки», а неосновными — электроны. Полупроводники, в которых концентрация «дырок» превышает концент-

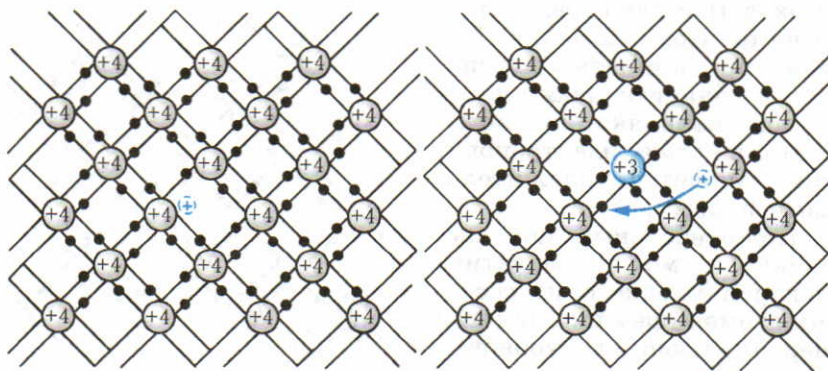


рис. 8.31

рацию электронов проводимости, называют полупроводниками *p*-типа или *дырочными* полупроводниками (от лат. *positivus* — положительный).

Очень небольшое количество примеси пяти- или трехвалентного вещества в кремнии приводит к резкому уменьшению его удельного электрического сопротивления. В 1 м^3 кремния содержится примерно 10^{28} атомов. Концентрация свободных электронов в чистом кремнии при комнатной температуре составляет $n = 10^{17} \text{ м}^{-3}$. Следовательно, на каждые сто миллиардов атомов кремния приходится один свободный электрон. Предположим, что всего 1% атомов кремния замещен атомами мышьяка. В 1% примеси мышьяка содержится 0,01 часть от 10^{28} , т. е. 10^{26} атомов в 1 м^3 . Если считать, что каждый атом мышьяка дает один электрон проводимости, то концентрация таких электронов, связанных с примесью, составляет 10^{26} м^{-3} . Она в 10^9 , т. е. в миллиард, раз больше, чем концентрация электронов в чистом кремнии. Во столько же раз соответственно уменьшается удельное сопротивление полупроводников.

■ Вопросы

1. Какие вещества называются полупроводниками? 2. Какой тип связи между атомами осуществляется в полупроводниковых кристаллах? 3. Что такое дырочная проводимость? 4. Атомы с какой валентностью могут быть донорными примесями? 5. Атомы с какой валентностью могут быть акцепторными примесями? 6. Какие носители заряда создают электрический ток в полупроводниках *n*-типа? 7. Какие носители заряда создают электрический ток в полупроводниках *p*-типа? 8. Как изменяется удельное электрическое сопротивление полупроводников: а) при нагревании; б) при освещении?

§ 72 Односторонняя проводимость контактного слоя

***p—n*-Переход.** Самым удивительным свойством полупроводников оказалось свойство односторонней проводимости так называемого *p—n*-перехода — контакта двух полупроводниковых кристаллов различного типа проводимости.

Для образования *p—n*-перехода нужно создать в кристалле с дырочной проводимостью область с электронной проводимостью (или, наоборот, в кристалле с электронной проводимостью область с дырочной проводимостью).

Такую область создают путем введения примеси в процессе выращивания кристалла, или атомы примеси вводят в готовый кристалл. Через границу, разделяющую области кристалла с различными типами проводимости, происходит диффузия электронов и «дырок» (рис. 8.32).

Диффузия электронов из *n*-области в *p*-полупроводник приводит к появлению в электронном полупроводнике не-

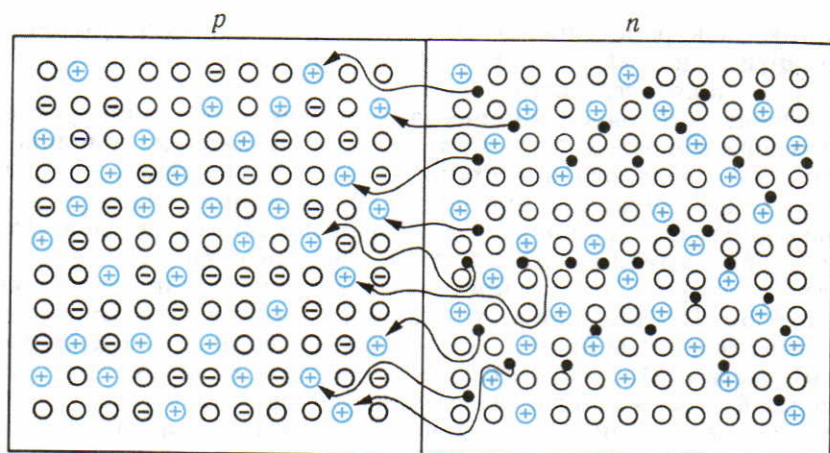


рис. 8.32

скомпенсированных положительных ионов донорной примеси. В дырочном полупроводнике рекомбинация электронов с «дырками» приводит к появлению нескомпенсированных зарядов отрицательных ионов акцепторной примеси (рис. 8.33). Между двумя слоями объемного заряда возникает электрическое поле. По мере накопления объемного заряда напряженность поля возрастает и оно оказывает все большее противодействие переходам электронов из n -полупроводника в p -полупроводник и соответственно «дырок» из p -полупроводника в n -полупроводник. Электронно-дырочный переход, или, сокращенно, p — n -переход, является границей, разделяющей обла-

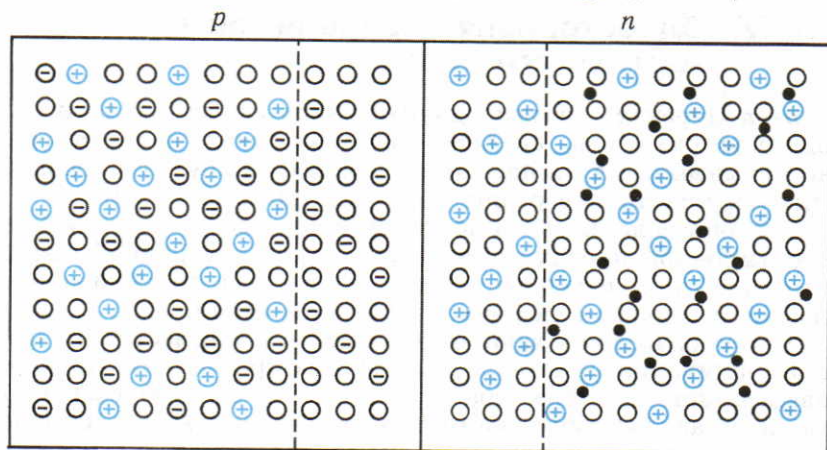


рис. 8.33

сти с дырочной (p) и электронной (n) проводимостями в одном и том же монокристалле.

Пограничная область раздела полупроводников с различным типом проводимости (она называется *запирающим слоем*) в связи с уходом свободных электронов и «дырок» практически превращается в диэлектрик.

Между областями с различным типом проводимости объемные заряды ионов создают запирающее напряжение U_z ; его значение для германиевых p — n -переходов равно примерно 0,35 В, для кремниевых — около 0,6 В.

Если p — n -переход соединить с источником тока так, чтобы с его положительным полюсом была соединена область с электронной проводимостью, то электроны в n -полупроводнике и «дырки» в p -полупроводнике удаляются внешним полем от запирающего слоя в разные стороны, увеличивая его толщину. Сопротивление p — n -перехода велико, сила тока мала и практически не зависит от напряжения. Этот способ включения p — n -перехода называется включением в запирающем или в обратном направлении. Обратный ток в этом случае обусловлен собственной проводимостью полупроводниковых материалов, образующих p — n -переход, т. е. наличием небольшой концентрации свободных электронов в p -полупроводнике и «дырок» в n -полупроводнике. Этот ток очень мал.

Если p — n -переход соединить с источником тока так, чтобы положительный полюс был соединен с областью с дырочной проводимостью, а отрицательный — с областью с электронной проводимостью, то переходы основных носителей через p — n -переход облегчаются. Двигаясь навстречу друг другу, основные носители входят в запирающий слой, уменьшая его сопротивление. Сила тока через p — n -переход в этом случае при напряжениях, превышающих U_z , ограничивается лишь сопротивлением внешней электрической цепи. Этот способ включения называется включением в пропускном или в прямом направлении.

Полупроводниковый диод. Способность p — n -перехода пропускать ток в одном направлении и практически не пропускать его в противоположном направлении используется в приборах, называемых *полупроводниковыми диодами*. Полупроводниковые диоды изготавливаются чаще всего из кристаллов кремния, в которых благодаря соответствующим примесям создаются соприкасающиеся между собой области с электронной и дырочной проводимостями. Если, например, на пластинку кремния с электронной проводимостью наплавить каплю индия (рис. 8.34), то поверхностный слой кремния, в который проникнут

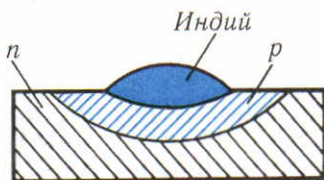
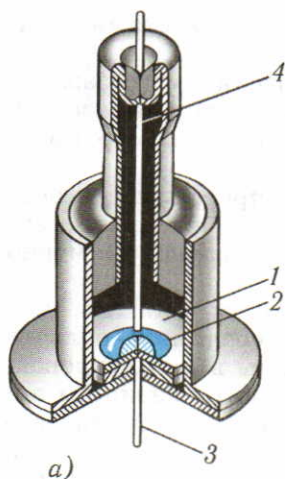


рис. 8.34



а)



б)

рис. 8.35

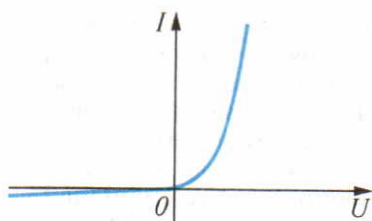


рис. 8.36

на некоторую глубину атомы индия, станет дырочным полупроводником. Тогда между областями кремния с электронной и дырочной проводимостью возникает $p-n$ -переход.

На рисунке 8.35, а показано устройство одного из полупроводниковых диодов, на рисунке 8.35, б — его условное обозначение. Основная часть диода представляет собой пластинку кремния 1 с наплавленным индием 2, которая помещена в металлический корпус, предохраняющий кристалл от внешних воздействий. К кремнию и индию присоединяют выводы 3 и 4, изолированные от корпуса.

Зависимость силы тока через полупроводниковый диод от напряжения, приложенного к нему, т. е. его вольт-амперная характеристика, показана на рисунке 8.36. Правая ветвь вольт-амперной характеристики соответствует пропускному направлению тока через диод (когда с возрастанием напряжения сила тока резко возрастает), а левая — запирающему.

Способность $p-n$ -перехода пропускать ток практически только в одном направлении используется для преобразования с помощью диода переменного тока в постоянный (точнее — в пульсирующий) ток. Отношение значения прямого тока к значению обратного при напряжении 1 В называется коэффициентом выпрямления. В хороших диодах коэффициент выпрямления достигает значений порядка 10^6 .

Область рабочих напряжений полупроводникового диода ограничена со стороны малых напряжений из-за повышения сопротивления $p-n$ -перехода с уменьшением прямого напряжения. Максимальное значение рабочего напряжения диода определяется напряжением пробоя $p-n$ -перехода при обратном напряжении.

Достоинствами полупроводниковых диодов являются малые размеры и масса, длительный срок службы, высокая механическая прочность, высокий коэффициент полезного действия. Существенный недостаток полупроводниковых диодов — зависимость их параметров от температуры. Полупроводниковые диоды не могут работать при температуре ниже -70°C из-за возрастания удельного сопротивления

полупроводниковых материалов с понижением температуры. При температурах выше 80°C для германиевых и 125°C для кремниевых диодов рабочие параметры резко ухудшаются из-за возрастания влияния собственной проводимости полупроводниковых материалов.

■ Вопросы

1. Что такое $p-n$ -переход? 2. Почему при отсутствии внешнего электрического поля электроны не переходят через $p-n$ -переход из n -полупроводника в p -полупроводник? 3. Почему $p-n$ -переход обладает односторонней проводимостью? 4. В чем заключаются преимущества полупроводниковых диодов по сравнению с вакуумными диодами? 5. Какими недостатками обладают полупроводниковые диоды? 6. Почему полупроводниковый диод нельзя использовать для выпрямления тока при очень малых переменных напряжениях? 7. Почему ограничено применение полупроводниковых диодов при высоких напряжениях?

§ 73 Транзистор

Устройство транзистора. Транзистор представляет собой полупроводниковое устройство с двумя $p-n$ -переходами.

С помощью соответствующих примесей в кристалле германия или кремния создают три области: между двумя областями 3 и 5 с проводимостью p -типа создают слой 2 с проводимостью n -типа, называемый базой (рис. 8.37). Одна из разделенных базой областей называется эмиттером, а вторая — коллектором. Таким образом, между эмиттером и базой, а также коллектором и базой создаются два $p-n$ -перехода 4 и 6, пропускные направления которых противоположны. На рисунке 8.38, а показано условное изображение транзистора $p-n-p$, а на рисунке 8.38, б — транзистора $n-p-n$.

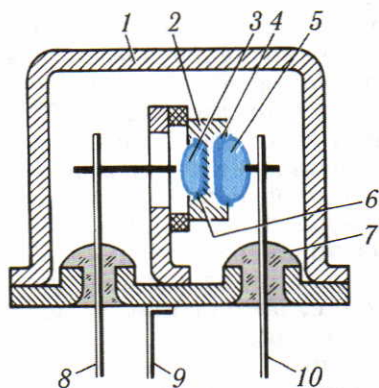


рис. 8.37

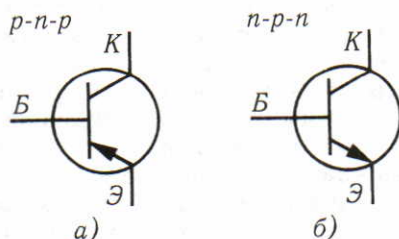
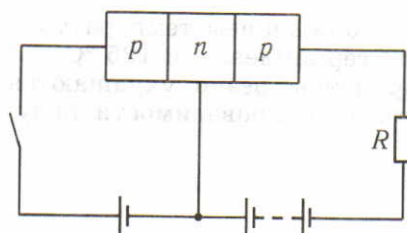


рис. 8.38



Цепь эмиттера Цепь коллектора
рис. 8.39

Электроды 8 и 10 (см. рис. 8.37) — это выводы эмиттера и коллектора, электрод 9 — вывод базы, 7 — изоляторы, 1 — защитный кожух.

Включение транзистора в цепь. Транзистор соединяют с двумя источниками тока (рис. 8.39). При этом переход «эмиттер — база» включают в пропускном,

а переход «коллектор — база» в запирающем направлении. Цепь, в которую включены эмиттер и база, называют цепью эмиттера, а цепь, в которую включены база и коллектор, называют цепью коллектора.

Пока цепь эмиттера разомкнута, в цепи коллектора ток очень мал, так как сопротивление этого $p-n$ -перехода для основных носителей (электронов в базе и «дырок» в коллекторе) в запирающем направлении велико. Как только замыкают цепь эмиттера, «дырки» — основные носители заряда эмиттера — переходят из него в базу, создавая ток в этой цепи. При этом значительная часть «дырок» проникает из базы в коллектор, так как для «дырок» — неосновных носителей заряда базы — такой переход является пропускным, и они создают ток в цепи коллектора.

Усилительное действие транзистора. Сила тока в эмиттере и коллекторе почти одинакова. Это объясняется тем, что большая часть «дырок» (до 95%), попадающих из эмиттера в базу, переходит в коллектор, так как базу делают в виде очень тонкого слоя, который «дырки» легко пересекают, почти не рекомбинируя с электронами базы. Поэтому при изменении силы тока в цепи эмиттера, например, с помощью источника переменного напряжения, одновременно почти во столько же раз изменяется сила тока в цепи коллектора. Эту особенность действия транзистора можно использовать для управления током в цепи коллектора. Для этого в цепь коллектора включают резистор с большим сопротивлением. Тогда небольшие изменения напряжения в цепи эмиттера могут вызывать значительные изменения напряжения на резисторе: при одинаковой силе тока в эмиттере и коллекторе напряжения на них пропорциональны сопротивлениям.

Применение полупроводниковых приборов в технике. Полупроводниковые приборы в настоящее время широко применяются в современной радиотехнике, автоматике, телемеханике и других областях науки и техники.

На искусственных спутниках Земли и на межпланетных кораблях установлены полупроводниковые солнечные батареи, в которых электрический ток создается за счет энергии

излучения Солнца. Солнечные батареи устанавливаются на крышах домов с целью получения энергии для их отопления, освещения. На солнечных батареях работают электромобили. В солнечных батареях главной частью также являются полупроводники с $p - n$ -переходом, на котором за счет энергии света возникает ЭДС.

Микроэлектроника. Качественно новый этап развития электронной вычислительной техники, систем связи, автоматики наступил в результате развития нового раздела электроники — микроэлектроники, которая занимается разработкой интегральных микросхем и принципов их применения.

Интегральной микросхемой называют совокупность большого числа взаимосвязанных компонентов — миниатюрных транзисторов, диодов, резисторов, конденсаторов, соединительных проводов, изготовленных в едином технологическом процессе на одном кристалле.

При изготовлении интегральной схемы на пластинку из полупроводникового материала наносятся последовательно слои примесей, диэлектриков, напыляются слои металла. Для каждого нового слоя используется своя технология нанесения и свой рисунок расположения деталей. В результате на одном кристалле одновременно создается несколько тысяч транзисторов, конденсаторов, резисторов и диодов, соединенных проводниками в определенную схему.

Наиболее революционные изменения благодаря разработке микросхем произошли в области электронной вычислительной техники. Вместо ламповых ЭВМ, содержащих десятки тысяч ламп и занимавших несколько этажей здания, транзисторных ЭВМ, занимавших большую комнату, созданы компьютеры на интегральных схемах, помещающиеся на столе. Микропроцессор *Pentium 4* содержит 42 млн транзисторов.

■ Вопросы

1. Как устроен транзистор? 2. Как включается транзистор в электрическую цепь? 3. На чем основана способность транзистора усиливать электрические сигналы?

МЕТОДЫ НАУЧНОГО ПОЗНАНИЯ И ФИЗИЧЕСКАЯ КАРТИНА МИРА

§ 74

Эксперимент и теория в процессе познания природы

Зарождение физики. Слово «физика» произошло от греческого слова *physis* — природа. Первым в Европе физиком считается Фалес (640—550 гг. до н. э.) из греческого города Милета. Фалес изучал явление притяжения магнитом железа, притяжения тел после натирания янтарем, высказал гипотезы о строении вещества и Вселенной. На протяжении около четырех столетий ученые-философы Древней Греции, от Фалеса Милетского до Архимеда, достигли замечательных успехов в познании окружающего мира.



Фалес
Милетский



Демокрит

Из наблюдений самых простых, повседневных явлений Левкипп и Демокрит (460—370 гг. до н. э.) сумели прийти к правильным выводам об атомном строении вещества, Пифагор (582—500 гг. до н. э.) высказал догадку о шарообразности Земли, а Эратосфен (276—195 гг. до н. э.) измерил радиус Земли. За 18 столетий до Николая Коперника Аристарх Самосский (около 280 гг. до н. э.) утверждал, что Солнце находится в центре мира, а Земля движется вокруг него. Архимед (287—212 гг. до н. э.) сделал много замечательных изобретений в механике, открыл условия плавания тел и даже изготовил первый планетарий, демонстрирующий движение Луны и планет, явление затмения Солнца.

При всем восхищении достижениями древнегреческих ученых необходимо обратить внимание, что значительных успехов они достигли в области математики и астрономии, а в области физики высказали лишь общие смелые гипотезы. Этот факт объясняется существенными различиями роли опыта в развитии математики и физики.

Опыт и теория в математике. Математика как наука оперирует такими абстрактными понятиями, как точка, линия, плоскость, по-



Архимед

верхность, число, множество, и многими другими. Эти понятия общепонятны, так как сформировались на основе практических действий человека с предметами материального мира. Если абстрактные математические понятия и правила действий с ними определены логически непротиворечиво, то создается возможность выводить логические следствия о свойствах математических понятий и результатах действий с ними по выбранным правилам. При удачно выбранных определениях математических понятий и правил действий с ними с помощью математики могут быть получены результаты, полезные в человеческой практике. Такие полезные результаты были получены еще во времена Древнего Вавилона и в эпоху строительства египетских пирамид.

Однако результаты, получаемые в математике, необязательно сразу находят практическое применение, а многие ее важнейшие аксиомы и выводы, полученные на основании этих результатов, не могут быть ни подтверждены, ни опровергнуты на опыте. Мир математики — самостоятельный, абстрактный, придуманный мир. Опровергнуть какое-либо математическое утверждение можно лишь внутри этого мира обнаружением логических противоречий в определениях понятий или последовательности логических действий и заключений.

Бессмысленным является спор о том, какая геометрия «правильная» — геометрия Евклида, в которой через одну точку вне прямой проходит одна и только одна прямая, не пересекающаяся с первой прямой, или геометрия Лобачевского, в которой таких прямых много, или геометрия Римана, в которой нет ни одной такой прямой. Все три геометрии одинаково «правильные», так как внутри их нет логических ошибок или противоречий.

Можно рассмотреть вопрос о том, какая из этих геометрий пригодна для использования в физике при описании свойств материального мира. Однако, если в изученной части Вселенной оказывается применимой, например, геометрия Евклида, это вовсе не означает «неправильность» других геометрий. Они могут оказаться полезными при расширении наших знаний о мире. Но если даже и не будет найден в природе объект, для описания которого была бы пригодна одна из созданных геометрий, это не сделает такую геометрию «неправильной», она останется одной из мыслимых геометрий.

Опыт и теория в физике. В отличие от математики для возникновения физики как самостоятельной науки одних лишь наблюдений за природными явлениями, размышлений над их результатами и логических рассуждений оказалось недостаточно.

Пример с построением систем из абстрактных моделей в геометрии показывает, что логически непротиворечивыми

могут быть различные взаимоисключающие теории, претендующие на описание одних и тех же фактов. Именно такими были результаты усилий древнегреческих ученых при их попытках объяснить все физические свойства окружающего мира на основе очень небольшого числа простых опытных фактов. Одни из них считали все тела состоящими из одинаковых неделимых и неразрушимых атомов, отличающихся друг от друга лишь размерами и формой, другие полагали, что видов атомов бесконечно много и свойства их различны, третьи отрицали возможность существования атомов и видели весь мир заполненным единой праматерией с различной плотностью в разных телах, но без малейших участков пустоты. Даже самые смелые гипотезы современных физиков, от гипотезы Большого взрыва и расширяющейся Вселенной до обсуждения возможности рождения звезд и галактик в результате столкновения двух сверхэнергичных элементарных частиц, не удивили бы древнего грека Анаксагора, учителя Перикла. Анаксагор учил, что бесконечно не только разнообразие материальных частиц, но и каждая отдельная частица подобна целому, заключает в себе качества всего существующего и в этом смысле содержит в себе бесконечность. По представлениям Анаксагора, Вселенная непрерывно увеличивается в размерах, неограниченно расширяясь, а каждая отдельная частица допускает возможность беспредельного деления.

Таким образом, отправляясь от одной исходной точки, возможные пути познания в форме построения гипотетических физических моделей расходятся в разные, часто противоположные стороны. Но в физике в отличие от математики нельзя признать, что разные теоретические модели строения мира имеют равные права на существование, так как физические модели претендуют на описание действительных свойств реально существующего мира, а мир мы знаем лишь один.

Эксперимент как критерий истинности теории. Во времена Демокрита, Сократа, Аристотеля и затем на протяжении еще двух тысячелетий большинство ученых считали возможным только рассуждениями доказать правоту своих гипотез о строении мира и законах, управляющих миром. Но такое предположение оказалось заблуждением.

О необходимости выполнения опытов для установления истины высказывались такие ученые Средневековья, как Роджер Бэкон (1214—1294), Френсис Бэкон (1566—1626) в Англии, Николай Кузанский (1401—1464) в Германии, великий Леонардо да Винчи (1452—1519) в Италии.

От общих утверждений о необходимости опоры на эксперимент при изучении природы решительные шаги к систематическим экспериментальным исследованиям природы сделал великий итальянский ученый Галилео Галилей (1564—



Роджер Бэкон



Леонардо да Винчи



Галилео Галилей

1642). Он же обогатил физику использованием математики для количественного описания физических явлений. Поэтому Галилея называют основателем новой физики.

Многовековой спор о том, являются ли небесные тела идеальными телами, непохожими на Землю, или они подобны Земле, Галилей разрешил экспериментальным путем, направив изготовленный им телескоп сначала на Луну, а затем и на Солнце. На Луне он обнаружил горы и долины, подобные земным, а на диске Солнца — темные пятна. Тем самым стиралась грань между земным и небесным, Земля получала права одной из планет Солнечной системы.

На протяжении почти двух тысячелетий в науке господствовало мнение Аристотеля (384—322 гг. до н. э.) о том, что тяжелые тела падают на Землю быстрее легких. Галилей, бросая шары, имеющие различный вес, с Пизанской башни, наглядными опытами доказал, что все тела независимо от их веса падают на Землю с одинаковым ускорением. Далее Галилей теоретически вывел, что при свободном падении тел пройденные пути должны быть пропорциональны квадрату времени движения. Этот вывод он проверил в специально поставленных опытах и доказал правоту своей теории.

Особенностями нового этапа в развитии физики, начиная с работ Галилея, стали поиски количественных закономерностей, связывающих физические величины, и проведение специальных экспериментов для установления предсказанных закономерностей. Переход от качественного описания наблюдаемых природных явлений в таких терминах, как большой — маленький, горячий — холодный, быстрый — медленный, к количественному описанию физических объектов и процессов потребовал разработки специальных приборов. Галилей обосновал возможность применения маятника для изготовления часов и измерения времени, сделал прибор для измерения температуры, являющийся прообразом современного термометра.

Начиная с работ Галилея можно выделить следующие этапы в изучении природного явления. На первом этапе изу-

чения природного явления происходит его непосредственное наблюдение. Чувственный опыт, считал Галилей, привлекает наше внимание к наблюдаемому явлению, но не открывает законов природы, так как книга природы «...написана на языке математики...». За чувственным опытом должно следовать выдвижение аксиомы, или, по современной терминологии, гипотезы. Выдвижение гипотезы является творческим процессом, в котором силой ума создается абстрактная упрощенная модель наблюдаемого явления, способная сделать его понятным для нас. За выдвижением гипотезы следует этап ее математического развития. Если математическое развитие гипотезы приводит к выводу следствий, до сих пор неизвестных науке, и эти следствия могут быть проверены экспериментально, то такое развитие гипотезы заслуживает названия физической теории. Если в экспериментах подтверждаются следствия, предсказанные физической теорией, то и сама теория может считаться подтвержденной экспериментом. Галилей обосновал необходимость экспериментальной проверки следствий из теории тем, что «...наши рассуждения должны быть о чувственном мире, а не о бумажном мире».

Существенным препятствием для развития науки в древности и в Средние века было противостояние научных и религиозных воззрений на природу и ее законы. Поскольку мир уже был объяснен до зарождения физики и астрономии с помощью представлений о богах (или Боге), создавших этот мир и управляющих им, попытки объяснить природные явления без привлечения сверхъестественных сил встретились в большинстве случаев с резким противодействием сторонников прежних взглядов. Анаксагора суд приговорил к смерти за то, что «...афиняне признавали солнце богом, [он] учил, что оно — огненный жернов». Заступничество Перикла спасло Анаксагора от смерти, но не от ссылки и запрещения всех сочинений. И через две тысячи лет после суда над Анаксагором спор о природе небесных светил и месте человека в этом мире не был закончен. В 1600 г. в Италии по приговору суда инквизиции был сожжен Джордано Бруно за учение о множественности обитаемых миров, так как судьи считали такую гипотезу «неправильной».

Галилео Галилей под страхом сурового наказания судом инквизиции был вынужден публично отречься от своих взглядов на устройство мира и признать заблуждениями свои замечательные астрономические открытия.

■ Вопросы

1. С чего начиналось зарождение физики как науки? 2. Что общего в отношении математики к опыту и в отношении физики к опыту? 3. В чем различие отношения математики к опыту и отношения физики к опыту? 4. По-

чему Галилео Галилея называют основателем новой физики? 5. Каковы основные этапы научного изучения природного явления? 6. Можно ли только путем логических рассуждений доказать, что Солнце неподвижно, а Земля движется вокруг него? А можно ли доказать обратное? 7. Может ли быть разрешен научный спор приговором суда?

§ 75 Моделирование явлений и объектов природы

Практика и теория. Процесс познания окружающего мира имеет две стороны — практику и теорию. Практика предполагает взаимодействие человека с предметами материального мира и является основой формирования элементарных знаний об окружающем мире.

Теория — это система обобщенных знаний, которая описывает, объясняет совокупность явлений реального мира и предсказывает какие-то новые явления или свойства исследуемых объектов. В отличие от практики теория не содержит процесса непосредственного взаимодействия человека с реальным миром. Предметом изучения теории являются абстрактные понятия, созданные умом человека на основе практики, т. е. взаимодействия человека с реальным миром.

Понятия о предметах. Каждый человек уже в детском возрасте на опыте взаимодействия с различными предметами приобретает разные практические знания. Когда родители предупреждают ребенка об опасности словом «горячо!» при его приближении к различным горячим предметам и он имеет возможность убедиться на собственном опыте, что эти предметы действительно горячие, то у ребенка постепенно формируется обобщенное понятие о горячем как свойстве, которое может быть присуще любому предмету. Аналогично формируются понятия о том, что означают слова «холодный», «сладкий», «горький», «тяжелый», «легкий» и другие понятия, характеризующие свойства предметов реального мира.

Понятия о предметах и явлениях природы существенно отличаются от самих предметов и явлений. Предметы и явления объективны, одинаковы для всех наблюдателей, а понятия о них у людей различны, индивидуальны, субъективны. Так, Солнце существует объективно, и оно одинаково для всех людей, а понятие о том, что такое Солнце, у каждого человека свое особенное, субъективное. Солнце остается одним и тем же, смотрит ли на него ребенок или ученый-астроном, а понятие человека о Солнце развивается, изменяется с приобретением жизненного опыта, научных знаний.

Физические модели. Для теоретического обобщения полученных знаний о материальном мире и природных явлениях используется метод моделирования. Моделирование — это

процесс замены одного объекта другим, специально созданным объектом, называемым моделью. Для успешного использования модели ее свойства должны быть возможно близкими к свойствам изучаемого объекта.

Модели бывают материальные и теоретические. Примером *материальной модели* может служить манекен, являющийся моделью человека. Он может быть признан хорошей моделью человека, если хорошо воспроизводит форму его тела, однако очевидно, что самый лучший манекен и даже говорящий робот совсем не то же самое, что человек. Любая модель не тождественна объекту, а лишь упрощенно воспроизводит некоторые из его свойств. Например, уменьшенную модель самолета изготавливают для испытания его в аэродинамической трубе, модели машин — для детских игр.

В физике широко используются *теоретические модели*. В этих моделях сложный природный объект заменяется мысленным, более простым воображаемым объектом, свойства которого близки к свойствам реального объекта. Свойства теоретической модели или ее составных частей задаются создателем модели такими, чтобы теоретическая модель обладала всеми основными известными свойствами реального объекта. Например, идеальный газ, являющийся моделью реального газа, представляется состоящим из идеально упругих точечных атомов или молекул. Если при анализе свойств теоретической модели обнаруживаются новые, неизвестные ранее закономерности, то открывается возможность экспериментальной проверки соответствия теоретической модели реальному объекту. При экспериментальном подтверждении существования свойств и явлений, предсказанных на основе использования теоретической модели, эта модель признается пригодной для дальнейшего развития теории. Так, на основе использования модели идеального газа Максвелл теоретически вывел закон распределения молекул идеального газа по скоростям. Экспериментальное подтверждение правильности теоретического предсказания Максвелла в опытах Штерна и других ученых показало, что модель идеального газа вполне пригодна для теоретического исследования свойств газов.

Однако любая теоретическая модель является лишь воображаемым объектом и упрощенно представляет некоторые, но не все свойства реального объекта. Модель идеального газа оказывается неприменимой для описания свойств реальных газов при высоких давлениях и низких температурах, когда становится неоправданным пренебрежение размерами молекул и силами притяжения между ними. Модель электрического взаимодействия электрона и протона как точечных электрических зарядов по закону Кулона оказывается совершенно неприменимой, если электроны разгоняются ускорителем до таких высоких энергий, что проходят сквозь протон.

**Джеймс Клерк
Максвелл**



**Майкл
Фарадей**



Таким образом, любая физическая модель объекта, процесса или явления лишь приблизительно отражает его свойства в определенных границах применимости этой модели.

Роль математики в развитии физики. Математическое описание природных процессов и явлений является одной из важнейших составных частей физической теории. Во-первых, оно дает количественное описание развития физического процесса в прошедшем и будущем времени. Такое описание не только открывает возможность количественной проверки физической теории, но и служит основой для изобретений различных машин и приборов, для использования открытых физических законов на практике. Во-вторых, анализ математического выражения открытых физических законов часто приводит к предсказанию новых, неизвестных ранее физических явлений. Экспериментальная проверка этих предсказаний является проверкой фактически новой, измененной или дополненной физической теории.

Так, например, Максвелл при разработке математического описания электромагнитных явлений, открытых экспериментально Фарадеем, составил систему уравнений, которую теперь называют уравнениями Максвелла. Эти уравнения выражают связь напряженности электрического поля E с индукцией магнитного поля B . Открытое Фарадеем явление электромагнитной индукции описывается уравнением, показывающим, что любое изменение магнитного поля порождает вихревое электрическое поле. Максвелл предположил, что аналогичное уравнение может быть записано и для случая изменения электрического поля. Из такого предположения следовала возможность возникновения электромагнитных волн, способных распространяться в пространстве со скоростью света. Это теоретическое предсказание Максвелла, сделанное на основе математического развития идей Фарадея, было экспериментально подтверждено опытами Герца.

■ Вопросы

1. В чем заключается отличие человеческих понятий о физических явлениях и природных объектах от самих явлений и объектов? 2. Что называют физической моделью? 3. Какова роль физических моделей в развитии физики? 4. Какова роль математики в развитии физики?

§ 76 Научные гипотезы

Можно было ожидать, что после разработки научного метода исследования природы и создания точных измерительных приборов все споры о том, какая гипотеза правильная, а какая ошибочная, прекратятся, так как появились объективные критерии установления истины. Однако и сегодня продолжают дискуссии между сторонниками различных физических воззрений и делятся порой десятилетиями. Чем же это объясняется? Чтобы ответить на этот вопрос, рассмотрим глубже утверждения, которые мы обсуждаем.

Что значит утверждение: установить истинность научной гипотезы? Для этого выясним сначала, что называют научной гипотезой.

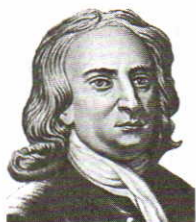
Само употребление сочетания слов «научная гипотеза» как будто предполагает, что возможно существование гипотез и другого типа. Это действительно так. *Научной гипотезой* называют только такую гипотезу, которая объясняет все известные научные факты на основе использования мысленной абстрактной модели изучаемых объектов и явлений реального мира, не содержит внутренних логических противоречий и из анализа свойств модели выводит следствия, неизвестные ранее и допускающие экспериментальную проверку. После проверки предсказанных следствий научная гипотеза может быть либо подтверждена, либо опровергнута результатами эксперимента. При экспериментальном подтверждении предсказанных следствий гипотеза получает признание как научная теория.

Таким образом, научными гипотезами называют только такие гипотезы, которые предсказывают что-то ранее неизвестное науке, и это предсказание может быть экспериментально проверено. Научная гипотеза обязательно включает в себя возможность экспериментального подтверждения или опровержения.

Именно такими были гипотезы Ньютона о существовании сил всемирного тяготения, Максвелла о существовании электромагнитных волн, Планка о существовании кванта действия, Резерфорда о существовании атомного ядра, Эйнштейна о существовании фотона.

Рассмотрим теперь примеры других гипотез. Одной из интереснейших гипотез в истории науки является гипотеза о множественности обитаемых миров. Научная ли эта гипотеза? Безусловно, научная. Она не противоречит известным фактам и предсказывает новые. Она в принципе допускает экспериментальную проверку. Достаточно обнаружить жизнь хотя бы еще на одной планете Солнечной системы или на планете около какой-нибудь другой звезды — и гипотеза будет подтверждена. Гораздо труднее, но в принципе возмож-

Исаак
Ньютон



Эрнест
Резерфорд



но эту гипотезу опровергнуть. Для этого нужно исследовать все планетные системы во Вселенной, и если жизнь там не будет обнаружена, то гипотеза будет опровергнута.

Широко известна гипотеза о посещении Земли пришельцами из других миров. Эта гипотеза кажется прямым продолжением гипотезы о множественности обитаемых миров, однако она едва ли заслуживает названия научной гипотезы. Для ее обоснования используются либо давно известные и объясненные наукой факты, либо утверждения о будто бы имевших место фактах, не объясненных наукой, но эти факты не имеют научного подтверждения. Гипотеза о пришельцах не делает и предсказаний, которые можно было бы экспериментально проверить. Так что гипотеза о пришельцах скорее *фантастическая гипотеза*, чем научная.

Еще один пример гипотезы — гипотеза о существовании у человека бессмертной души и ее существовании после смерти человека в другом мире. Эта гипотеза не может быть ни подтверждена, ни опровергнута методами науки — ни физикой, ни химией, ни биологией, поскольку свойства души и потустороннего мира, согласно гипотезе, изначально недоступны научному исследованию, лежат за пределами возможностей человека этого мира. Гипотезы такого типа не относятся к числу научных гипотез в силу их непроверяемости методами науки. Непроверяемые гипотезы называют *метафизическими гипотезами*. Невозможность научного доказательства или опровержения метафизической гипотезы не лишает ее права на существование. Принять или отвергнуть такую гипотезу является делом веры человека в ее истинность или неверия в нее.

■ Вопросы

1. Какие гипотезы называются научными? 2. Какие гипотезы называются метафизическими? 3. Чем отличается научная гипотеза от метафизической? 4. Приведите примеры научных гипотез.

Причина и следствие. Формирование обобщенных понятий о предметах и явлениях природы и обозначение их словами является первым шагом теоретического осмысления мира. После этого открывается возможность установления причинно-следственных связей между исследуемыми явлениями, событиями. Явление или процесс называется *причиной* другого явления или процесса в том случае, если первый процесс предшествует второму по времени и является обязательным условием для возникновения второго процесса. Вторым процесс в этом случае является *следствием* первого процесса. Один и тот же процесс в первом случае может быть причиной другого процесса, а во втором случае — его следствием. Например, при нагревании металлический стержень удлиняется. В этом случае нагревание стержня является причиной, а удлинение стержня — следствием нагревания. Если же к стержню приложить внешнюю силу и вызвать его растяжение, то в результате деформации растяжения произойдет повышение температуры стержня. В этом случае растяжение стержня является причиной повышения его температуры.

Законы природы. Установив причинно-следственные связи в различных природных явлениях, человек пытается найти единое теоретическое объяснение многим явлениям, обладающим какими-то общими признаками. Например, наблюдается падение на землю снега с неба, яблока с ветви яблони, книги со стола. Каждый случай в бытовой практике объясняется по-своему. Почему падает снег? Потому что пришла зима и стало холодно. Почему упало яблоко? Потому что оно созрело. Почему упала книга со стола? Потому что ее толкнули за край стола, вот она и упала. Каждое из этих объяснений в каком-то смысле правильное, но в них не обращается внимание на существенную деталь: снег, яблоко, книга и любые другие предметы всегда и везде падают на землю, если только что-нибудь не удерживает их от падения. Когда выведено из наблюдений такое общее свойство тел, оно дает возможность объяснения любого факта падения тел. Теоретическое осмысление явлений падения различных тел завершается формулировкой *закона природы*: все свободные тела падают на землю. Законом природы называют утверждение, выражающее существенную и устойчивую связь природных явлений.

Динамические и статистические закономерности. Закономерности, связи между различными физическими величинами, характеризующими физические процессы, бывают двух видов — *динамические* и *статистические*. Динамическими называют такие закономерности, в которых точно известные

причины позволяют получать точно известные следствия. Примером динамической закономерности может служить результат действия известной силы F на тело известной массы m : согласно второму закону Ньютона, тело приобретет ускорение a , точно определяемое уравнением

$$a = \frac{F}{m}.$$

Динамический характер имеют закономерности взаимодействия тел силами всемирного тяготения, действия электромагнитных полей на электрические заряды и многие другие процессы.

Статистическими называют такие закономерности, в которых известная причина не позволяет получить точно известное следствие, а указывает лишь его вероятность. Статистические закономерности устанавливаются в случае взаимодействия большого числа тел или неконтролируемого и случайным образом изменяющегося во времени внешнего воздействия на одно тело. Статистический характер имеют все закономерности, описывающие процессы в микромире.

При бросании кубика с цифрами от 1 до 6 на гранях невозможно предсказать, грань с какой цифрой окажется верхней, так как на кубик действуют рука, воздух, стол и эти действия случайно изменяются при каждом броске. Однако если все грани совершенно одинаковы, то при большом числе бросков каждая грань выпадет примерно одинаковое число раз. Это статистическая закономерность. Для одного броска такая закономерность позволяет сделать лишь вероятностное предсказание. Например, вероятность выпадения цифры 1 (как и любой другой из возможных шести цифр) при одном броске равна $1/6$.

Примером статистической закономерности может служить связь между абсолютной температурой газа и скоростью беспорядочного теплового движения его молекул. Знание точного значения температуры газа не позволяет определить точное значение скорости одной молекулы, так как скорость молекулы газа при каждом столкновении изменяется. Однако вполне возможно определить среднее значение скорости большого числа молекул газа или найти для молекулы вероятность обладания данным значением скорости.

Научные факты. Установление закона природы всегда основывается на научных фактах. *Научными фактами* называют такие утверждения, которые могут быть проверены и независимо подтверждены при выполнении заданных условий любым человеком. Например, утверждение о том, что ускорение любого тела прямо пропорционально приложенной к нему силе и обратно пропорционально массе тела, является научным фактом. Это утверждение может проверить каждый и убедиться в его правильности.

А вот утверждения некоторых людей о том, что они видели летающие тарелки и беседовали с инопланетянами, до сих пор не являются научным фактом, так как эти люди не могут (или не хотят?) сообщить остальным, каким способом любому человеку можно убедиться в реальности существования летающих тарелок.

Физические величины. Для теоретического описания природных явлений в физике вводятся понятия, с помощью которых возможна количественная характеристика физических свойств тел и природных процессов. Например, известно, что одни тела Земля притягивает сильнее, другие — слабее. Но что значат слова «сильное притяжение», «слабое притяжение»? В них отражены лишь личные ощущения одного человека, пытавшегося поднять два разных предмета. А как передать свой опыт в познании мира другим людям? То, что одному тяжело, другому легко. В физике для точного количественного описания физических явлений вводятся *физические величины*. Для количественного выражения действия одного тела на другое вводится физическая величина, называемая силой. Чем отличается понятие «притяжение» от понятия «сила»? Понятие «притяжение» указывает лишь на направление действия одного тела на другое, понятие «сила» дает возможность количественной меры действия одного тела на другое.

Для измерения сил изготавливаются приборы — динамометры и вводится единица силы — ньютон. Значение силы определяется по деформации пружины динамометра.

Неодинаковость силы притяжения разных тел к Земле указывает на то, что все тела обладают чем-то, от чего зависит сила их притяжения к Земле. Это что-то — еще одна физическая величина, названная массой тела. Чем больше масса тела, тем больше сила его притяжения к Земле. Выбрав одно тело за эталон и приняв его массу за единицу массы — килограмм, мы можем найти массу любого другого тела, сравнив силу притяжения этого тела к Земле с силой притяжения эталона к Земле. В результате закон свободного падения всех тел на Землю превращается в закон притяжения всех тел Землей: любое тело притягивается к Земле силой, пропорциональной массе тела. Этот закон уже имеет математическое выражение

$$F = mg.$$

Что нового дает человеку использование придуманных им абстрактных понятий «масса» и «сила»? Что дает закон притяжения с использованием этих абстрактных понятий? Эти изобретения теории, основанные на экспериментальном изучении природы, позволяют по измеренной силе притяжения

к Земле определить массу тела или по известной массе тела вычислить силу его притяжения к Земле. Такие умения находят широкое применение в практической жизни людей.

Могут ли придуманные человеком абстрактные понятия играть существенную роль в процессе познания реального мира? Не только могут, но и, безусловно, играют. В любой физической теории, в любом физическом законе устанавливаются связи между физическими величинами, но не между какими-то реальными телами, предметами. Теория оперирует лишь с абстрактной моделью реального мира. Если с помощью теории удастся правильно предсказать результаты опыта с реальными физическими объектами, то это означает, что в абстрактной физической модели реального мира были выделены существенные свойства реального мира.

■ Вопросы

1. Как определить, что является причиной и что следствием в ряду природных явлений? 2. Что называют законом природы? 3. Какие законы природы называют динамическими? 4. Какие законы природы называют статическими? 5. Какие факты называют научными? 6. Для чего вводятся физические величины?

§ 78 Границы применимости физических теорий и законов

Границы применимости физических теорий и законов. Физические теории и законы имеют определенные границы применимости. Границы применимости теории определяются прежде всего условием применимости физической модели, использованной при создании теории. Экспериментально установленные законы применимы лишь в тех условиях, в которых они установлены. Например, если в молекулярно-кинетической теории использована модель идеального газа, то выводы и законы этой теории применимы к реальным газам лишь в том случае, если свойства реального газа приближаются к свойствам идеального газа.

Закон сохранения энергии установлен экспериментально для изолированных систем, поэтому и ожидать его выполнения можно лишь в изолированных системах.

Классический закон сложения скоростей экспериментально установлен в опытах при значениях скорости движения тел, значительно меньших скорости света. Поэтому нет оснований для уверенности в его применимости при скоростях движения, близких к скорости света. И в экспериментах действительно обнаружено, что при скоростях, близких к скорости света, действует другой закон сложения скоростей, названный релятивистским законом сложения скоростей.

Развитие теории. Заканчивается ли создание физической теории введением физических понятий, формулировкой физических законов и указанием границ их применимости? Конечно же нет. Существующие связи явлений природы, ее законы человеку не удастся понять сразу и до конца.

На первых порах в качестве закона выступает лишь обобщение результатов практики, созерцания явлений природы. По мере расширения области познания мира открытые ранее законы природы переосмысливаются человеком, получают новую формулировку, а явления, описываемые законом, получают более полное объяснение. Дальнейший процесс познания мира, в том числе и с помощью существующей физической теории, приводит к открытиям новых фактов, новых явлений, которые не может объяснить существующая теория. Для объяснения новых фактов выдвигаются новые гипотезы и разрабатывается новая физическая теория. В этой новой теории физические понятия, использовавшиеся прежней теорией, могут значительно измениться. Это необходимо для того, чтобы новая теория могла объяснить не только ранее известные факты, но и все новые факты и явления.

Принцип соответствия. Как показывает история развития науки, любая научная теория спустя какое-то время после создания встречается с неразрешимыми трудностями и заменяется новой теорией. Каковы взаимоотношения между старой и новой теориями? История развития науки показывает, что если старая физическая теория была построена на использовании достоверных научных фактов, не содержала логических ошибок и объясняла все известные ранее факты и явления, то между старой и новой теориями обычно обнаруживается такое соответствие, которое позволяет получить старую теорию из новой в качестве частного случая. Так, из закона всемирного тяготения, применимого для любых тел во Вселенной — от элементарных частиц до галактик, — для условий на поверхности Земли можно получить как следствие более ограниченный, частный закон в виде

$$F = mg.$$

Такую связь между старой и новой физическими теориями выражает *принцип соответствия*. Согласно принципу соответствия новая теория не отрицает старую теорию полностью. Новая теория содержит возможность установления преемственной связи между старой и новой теориями и в ограниченной области применения дает те же результаты, что и старая. Закончилось ли развитие теории гравитации открытием закона всемирного тяготения? Будет ли этот закон когда-нибудь опровергнут? До сих пор нет ясности, что является носителем сил всемирного тяготения. Предполага-

ется, что в природе существуют элементарные частицы — гравитоны, с помощью которых осуществляется гравитационное взаимодействие. Однако экспериментально гравитоны еще не обнаружены.

Не закончится развитие теории гравитации и после открытия гравитонов. Однако независимо от того, какой будет новая теория, в качестве частного предельного случая она даст ньютоновский закон всемирного тяготения. Таким образом, развитие науки в основном идет не путем отмены, опровержения ранее добытых знаний, а путем их уточнения, дополнения, углубления, хотя полностью не гарантирована от ошибок и заблуждений и наука. В истории каждой науки, и в физике в том числе, были и случаи создания ошибочных теорий.

Скоро ли окончится наука? Нельзя ли найти надежные критерии истинности научных теорий, для того чтобы быстрее обнаружить имеющиеся недостатки в существующих теориях и построить истинную научную теорию, не имеющую никаких расхождений с действительностью? Такая задача некоторым ученым представлялась достижимой, и они считали, что наконец-то создали окончательную, точную, неопровержимую научную теорию, полностью и правильно описывающую реальный мир. Но Ньютон, создатель теории всемирного тяготения, один из величайших ученых всех времен, думал о своих достижениях значительно скромнее. Он писал: «Не знаю, каким я кажусь людям, но я себе представляюсь ребенком, который играет на берегу моря и радуется, когда ему удастся отыскать гладкий камушек или красивую раковину не совсем обыкновенного вида, в то время как неизмеримый океан истин лежит передо мною неисследованным». Убеждение Ньютона о существовании неизмеримого океана истин, еще не открытых человеком, разделяют и большинство современных ученых, исследующих природу.

■ Вопросы

1. Почему физические законы и теории имеют определенные границы применимости? 2. Почему происходит замена одних физических теорий другими? 3. Каково соответствие между старой и новой физическими теориями?

§ 79

Физическая картина мира

Предположения о возможности исчерпания науки о природе могут показаться естественными, если не понимать существенного различия между физической картиной мира и реальным миром. *Физической картиной мира* называют систему представлений о природе, основанную на наиболее общих и универсальных законах физики. В XVII—XVIII вв.

в науке господствовала *механическая картина мира*. В этот период казалось возможным все явления в природе объяснить на основе открытых законов механики. После открытия и изучения в XIX в. законов электрического и магнитного взаимодействия механическая картина мира оказалась несостоятельной. Успехи в изучении электрических и магнитных явлений открыли возможность построения *электромагнитной физической картины мира*, в которой все явления и законы природы получили объяснение на основе применения законов электрического и магнитного взаимодействия. Двадцатый век стал эпохой открытий строения атома и атомного ядра, открытия и изучения свойств элементарных частиц. Для объяснения свойств атомов и элементарных частиц оказалось недостаточно механики и электродинамики. *Современная физическая картина мира* основана на представлениях об универсальности *законов квантовой физики*, способной объяснить все явления в природе — от превращений элементарных частиц до вспышек сверхновых звезд и расширения Вселенной.

Если считать тождественными физическую картину мира и реальный мир, природу, то необходимо признать, что физика как наука обязательно придет к концу своего развития. Так в свое время фактически завершилось развитие механики и электродинамики. Но нельзя забывать о том, что любая физическая теория имеет объектом изучения не сам реальный мир, а лишь его упрощенную модель. Эта модель — изобретение человеческого ума, а не сам объективный мир. Есть все основания быть уверенными, что реальный мир сложнее, многостороннее, многообразнее любой изобретенной до сих пор физической модели. Поэтому завершение развития какой-то физической теории или физической картины мира вовсе не является доказательством полного познания природы. Оно означает лишь исчерпание возможностей упрощенной физической модели, лежащей в основе теории. Для дальнейшего развития науки нужны новые научные факты и основанные на них новые физические модели и теории, способные точнее, полнее раскрыть законы природы.

Изобретение микроскопа, телескопа, рентгеновской трубки, электронного осциллографа, радиоприемника, камеры Вильсона, счетчика Гейгера и многих тысяч других приборов позволило открыть тысячи и тысячи новых физических явлений. Эти открытия показывают, что природа значительно богаче, многообразнее, чем она представляется человеку, вооруженному лишь собственными органами чувств. И сегодня нет никаких оснований для предположений о том, что природа уже исчерпала все свои секреты и наука приблизилась к последним границам познания.

Практика как критерий истины. Но если до полного, окончательного познания природы почти так же далеко, как и во времена древнегреческой науки, имеют ли ценность современные научные знания?

Истинность добытых наукой знаний в каждый исторический период контролируется не только логическими доказательствами и специально поставленными опытами. Решающим критерием истинности научных знаний является человеческая практика. Физик, исследующий явление природы, обычно не ставит перед собой задач практического применения исследуемого явления. Его интересует прежде всего вопрос, как и почему происходит это явление. Например, Майкл Фарадей, открывший явление электромагнитной индукции, на вопрос министра финансов, посетившего его лабораторию, о том, какое практическое приложение найдет это открытие, не смог дать даже предположительного ответа. Однако он выразил уверенность, что приложение будет найдено и министерство финансов обложит его налогом. И это предположение полностью подтвердилось, так как все электрогенераторы и электромоторы, электрическое освещение, радио, телефон, телевидение, компьютеры были бы невозможны без открытия этого явления.

Резерфорд, открывший атомное ядро и возможность осуществления ядерных реакций, не верил в возможность практического применения ядерной энергии. Однако вслед за учеными-исследователями идут инженеры-изобретатели, которых интересует не столько само физическое явление, сколько возможности его практического использования. Изобретенные и изготовленные на основе научного открытия приборы и машины работают и тем самым подтверждают истинность научного открытия.

Убежденность ученых в том, что законы механики истинны, основана не на результатах нескольких, пусть даже очень точных научных опытов, а прежде всего на том, что они подтверждены на протяжении столетий всей человеческой практикой. На основе законов механики строятся дома и мосты через реки, летают самолеты и космические ракеты. И соответствие действительности странным законам квантовой физики доказывается не столько опытами по наблюдению дифракции электронов, сколько успешной работой ядерных реакторов, транзисторов, лазеров.

Любое дальнейшее развитие науки не отменяет открытые ранее законы, не обесценивает уже добытые знания, а углубляет и обогащает их. И через сто, и через тысячу лет планеты, кометы и космические корабли будут двигаться точно по таким же траекториям, по каким они движутся сегодня. Как и сегодня, силу тока в электрической цепи можно будет рассчитывать на основании закона Ома. Другое дело, что будут

созданы другие двигатели для космических ракет и иные источники тока. Могут быть открыты новые физические явления и законы природы, неизвестные ранее, но это не отменит известных сегодня законов, не обесценит добытых ранее знаний.

■ Вопросы

1. Что называют физической картиной мира? 2. Каковы были основные положения механической картины мира? 3. Каковы были основные положения электромагнитной картины мира? 4. Какова современная физическая картина мира? 5. Является ли современная физическая картина мира окончательным этапом процесса познания природы?



ГЛАВА 10

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

1. Измерение массы

Оборудование: весы технические, разновес, линейка измерительная, монета, прямоугольный параллелепипед из пенопласта.

Задание: измерьте массы монеты и прямоугольного параллелепипеда с помощью весов.

Содержание и метод выполнения работы

В повседневной практике и в технике обычно используется метод измерения масс тел путем сравнения сил их гравитационного притяжения к Земле с силой притяжения эталона — килограмма. Такое сравнение выполняется с помощью весов.

При использовании равноплечих рычажных весов на одну чашу весов помещается тело неизвестной массы, а на другую ставятся гири для уравнивания весов. Масса тела равна массе гирь, уравнивающих весы.

Используются также весы со стальными пружинами, работающими на растяжение или закручивание (пружинные весы). Деформация пружины пропорциональна приложенной силе, а сила гравитационного притяжения тела к Земле пропорциональна его массе. Поэтому деформация пружины оказывается пропорциональной массе тела. Шкала весов градуируется при подвешивании тел с известной массой.

Порядок выполнения работы

1. Приготовьте весы для взвешивания. Для этого установите их на столе и с помощью уравнивательных винтов 1

(рис. 10.1) установите стойку 2 весов вертикально. При вертикальном положении стойки весов острое отвеса 3 совпадает с острием шпильки 4 на основании весов.

После установки стойки весов в вертикальное положение поверните ручку 5 арретира. При этом поднимается опорная пластина 6, на которую опирается призма 7 коромысла 8 весов. Весы приводятся в рабочее состояние.

Если после поворота ручки арретира стрелка 9 совершает небольшие колебания и ее максимальные отклонения от 0 по шкале 10 вправо и влево примерно одинаковы, то весы готовы к работе.

Если же стрелка весов отклоняется влево или вправо от нулевого деления шкалы, то необходимо продолжить регулировку весов. Причинами неуравновешенности весов могут быть неправильная установка серьги 11 на призме 12 коромысла, неправильное положение тарировочных гаек 13 на коромысле весов. Проверив правильность положения серьги, добейтесь равновесия весов вращением тарировочных гаек.

2. Для взвешивания тела сначала арретируйте весы поворотом ручки 5. Положите взвешиваемое тело на левую чашку весов, а гири примерно с такой же массой на правую чашку. (Гири разновеса следует брать пинцетом!) Плавно поворачивая ручку арретира, проверьте, находятся ли весы в равновесии.

Если масса гирь меньше массы тела, добавляйте гири до наступления равновесия, при избытке снимайте гири до уравнивания весов.

3. Оцените абсолютные и относительные границы погрешности измерений масс монеты и прямоугольного параллелепипеда.

Граница абсолютной погрешности измерения массы m с помощью весов равна сумме границы погрешности весов $\Delta m_{\text{в}}$, границы погрешности гирь $\Delta m_{\text{г}}$ и границы погрешности подбора гирь $\Delta m_{\text{п}}$:

$$\Delta m = \Delta m_{\text{в}} + \Delta m_{\text{г}} + \Delta m_{\text{п}}.$$

Границу погрешности весов $\Delta m_{\text{в}}$ можно определить по

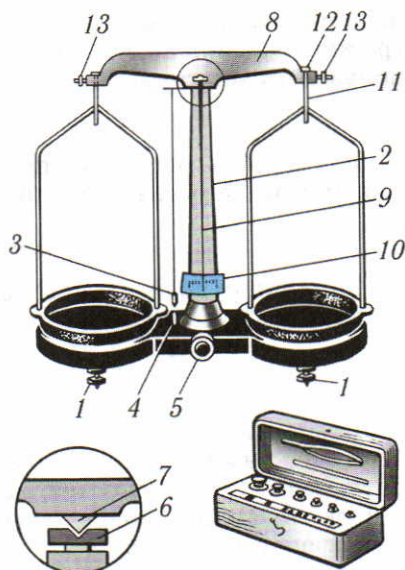


рис. 10.1

паспортным данным весов, зная массу тела m . Граница погрешности гирь равна сумме границ погрешностей всех использованных гирь:

$$\Delta m_r = \Delta m_1 + \Delta m_2 + \dots + \Delta m_n.$$

Граница погрешности подбора гирь равна половине значения массы наименьшей гири:

$$\Delta m_n = \frac{m_{\min}}{2}.$$

Граница относительной погрешности измерений массы определяется отношением

$$\varepsilon = \frac{\Delta m}{m}.$$

4. Результаты измерений и вычислений занесите в отчетную таблицу.

Дополнительное задание: оцените границы систематических погрешностей измерений массы, обусловленных действием архимедовой силы на взвешиваемое тело и гири в атмосферном воздухе.

Отчетная таблица

Номер опыта	m , г	Δm_b , мг	Δm_r , мг	Δm_n , мг	Δm , мг
1					
2					

2. Измерение сил и ускорений

Оборудование: секундомер, измерительная лента, деревянный брусок, весы, разновес, нить, блок, чашка на подвесе.

Задание: рассчитайте ускорение бруска при действии на него силы 0,5 Н. Измерьте ускорение бруска под действием силы 0,5 Н и сравните с результатами расчета.

Содержание и метод выполнения работы

Сила в СИ является производной величиной. Поэтому не существует эталона единицы силы, с которым можно было бы сравнивать другие силы.

Самый простой способ градуировки динамометра основан на использовании силы тяжести. Зная значение ускорения свободного падения g в данном месте и массу m тела, можно вычислить силу тяжести F_r , действующую на тело со стороны Земли.

Подвесив тело известной массы на крючок динамометра, можно отметить на шкале данное значение силы. Имея набор тел с различными массами, можно сделать ряд отметок на шкале динамометра.

Ускорение, как и сила, является производной физической величиной. Поэтому нет эталона ускорения, с которым можно было бы сравнивать ускорения тел. Ускорения тел можно определять путем измерения других физических величин, связанных с ускорением. Динамический способ измерения ускорения основан на измерении силы, вызывающей ускорение тела известной массы. Кинематический способ измерения ускорения при равноускоренном движении может быть основан на измерении изменения скорости за данный промежуток времени или пройденного пути за это время.

Порядок выполнения работы

1. Измерьте массу бруска с помощью весов. Вычислите ускорение a_t , с которым будет двигаться брусок под действием силы 0,5 Н.

2. Привяжите к крючку на бруске нить. Укрепите на краю стола блок. Пропустите нить через блок и привяжите к ее концу чашку на подвесе (рис. 10.2). Нить должна быть параллельна горизонтальной поверхности стола.

3. Используя разновес, выберите такой груз в чашке на подвесе, который создаст силу натяжения нити, равную по модулю силе трения бруска о поверхность стола. После мягкого толчка груз должен двигаться равномерно по поверхности стола.

4. Установите брусок на противоположном от блока краю стола. Измерьте расстояние от бруска до блока. Удерживая брусок, положите на чашку дополнительный груз массой 0,05 кг. Отпустите брусок и в тот же момент запустите секундомер.

В момент столкновения бруска с блоком остановите секундомер. Запишите показания секундомера.

5. По измеренным значениям пути и времени вычислите ускорение a_s .

6. Оцените границы погрешностей измерений ускорения в обоих опытах и определите, согласуются ли эти значения ускорения. Результаты измерений и вычислений занесите в отчетную таблицу.

Дополнительное задание: сделайте более точный расчет ускорения бруска под действием груза массой

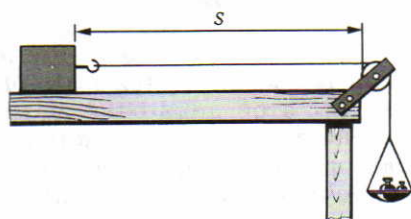


рис. 10.2

0,05 кг, положенного на чашку. Для этого учтите, что при ускоренном движении системы брусок — груз сила натяжения не равна силе тяжести, действующей на груз.

Отчетная таблица

m , кг	F , Н	a_t , м/с ²	Δm , кг	ε_m	ε_{a_t}	Δa_t , м/с ²	s , м	t , с	a_0 , м/с ²	Δs , м	ε_s	Δt , с	ε_t	ε_{a_0}	Δa_0 , м/с ²

3. Измерение импульса

Оборудование: наклонная плоскость, полоса бумаги, линейка измерительная, монеты разного достоинства.

Задание: определите импульс массивной монеты после ее скольжения по наклонной плоскости. Поставьте на пути массивной монеты более легкую и проанализируйте результат их взаимодействия. Сравните импульс системы из двух монет до столкновения с импульсом этой системы после столкновения монет.

Содержание и метод выполнения работы

В специальных измерениях импульса тела нет необходимости, если известны его масса и скорость. В этом случае импульс находится как их произведение. Однако в физике довольно часто встречаются случаи, когда прямые измерения массы и скорости тела оказываются затрудненными или невозможными, но сведения о них можно получить на основании измерений импульса тела. Такая ситуация характерна для многих экспериментов в области ядерной физики и физики элементарных частиц, в которых обнаруживаются новые частицы с неизвестной массой. Измерив импульс и кинетическую энергию частицы, можно определить затем ее массу и скорость.

Измерение импульса тела с неизвестной массой, движущегося с неизвестной скоростью, возможно на основании закона сохранения импульса.

В данной работе исследуется суммарный импульс системы из двух монет до и после их соударения. При этом импульсы сравниваются векторно в случае нецентрального удара. Для этой цели одна из монет соскальзывает с наклонной плоскости и затем сталкивается с неподвижной монетой. Так как массы монет известны, то для определения их импульсов нужно определить их скорости. Они вычисляются по длине тормозного пути и измеренному коэффициенту трения монеты о бумагу.

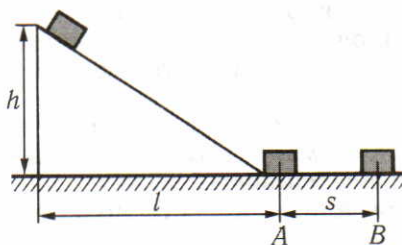


рис. 10.3

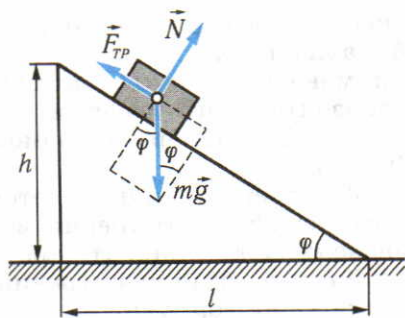


рис. 10.4

Предоставим монете возможность после соскальзывания с наклонной плоскости двигаться по бумаге на горизонтальной поверхности стола до остановки. Измерим тормозной путь, пройденный монетой по горизонтальной поверхности от точки A — положения центра монеты в начале пути — до точки остановки B (рис. 10.3). Как легко доказать, скорость монеты в точке A равна:

$$v = \sqrt{2\mu g s}. \quad (1)$$

Если поверхности наклонной и горизонтальной плоскостей выполнены из одного и того же материала, то им соответствует один и тот же коэффициент трения:

$$\mu = h/(l + s). \quad (2)$$

Для вывода этой формулы воспользуйтесь рисунками 10.3 и 10.4.

На основе этих данных можно найти значение модуля импульса монеты p до столкновения.

Так как вторая монета до столкновения находится в покое, импульс первой монеты до столкновения равен импульсу системы из двух монет после столкновения:

$$\vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2. \quad (3)$$

Порядок выполнения работы

1. Положите на наклонную плоскость полосу бумаги таким образом, чтобы часть ее (длиной 25—30 см) находилась на горизонтальной поверхности стола.

Монета, положенная на поверхность бумажной полосы на наклонной плоскости, должна плавно соскальзывать по ней и двигаться по горизонтальной поверхности до остановки. Подберите такие угол наклона плоскости и начальное положение запуска монеты, чтобы путь монеты на горизонтальной поверхности составлял 15—25 см.

2. Отметьте начальное положение монеты на наклонной плоскости и ее конечное положение на горизонтальной пло-

скости. Проведите на горизонтально расположенном участке бумажной полосы прямую, по которой двигался центр диска монеты. Отметьте положение центра монеты в начале горизонтального участка пути (точка A) и в его конце (точка B). Измерьте тормозной путь $s = AB$ (отрезок AB) (рис. 10.5).

3. Измерьте длину катетов h и l . По формуле (2) определите коэффициент трения монеты о бумагу. Найдите среднее значение коэффициента трения и погрешность.

Зная коэффициент трения, определите скорость монеты в точке A по формуле

$$v = \sqrt{2\mu g s} = \sqrt{2ghs/(l+s)}. \quad (4)$$

Телом массой m_1 может служить монета массой 5—6 г, телом меньшей массы m_2 — монета массой 3—4 г.

4. Поставьте на пути движения первой монеты вторую таким образом, чтобы столкновение произошло в тот момент, когда центр диска первой монеты проходит через точку A . Удар должен быть нецентральный (см. рис. 10.5).

Отметьте начальное положение центра диска второй монеты (точка C на рис. 10.5). Запустите первую монету с того же места на наклонной плоскости, как и в первом опыте. Отметьте конечное положение центров дисков первой (точка E) и второй (точка D) монет (см. рис. 10.5). Соедините точки A и E отрезком AE , точки C и D отрезком CD . Измерьте расстояния s_1 и s_2 .

5. По известным значениям масс монет m_1 и m_2 , тормозных путей s , s_1 , s_2 и коэффициента трения μ вычислите значения скоростей монет v , v_1 и v_2 и модулей p , p_1 и p_2 их импульсов.

6. Отложите на прямых, проходящих через точки A и B , A и E , C и D , отрезки, пропорциональные модулям импульсов монет. Постройте векторы $\vec{p}$, $\vec{p}_1$, $\vec{p}_2$ (рис. 10.6). Проверьте, выполняется ли условие:

$$\vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2.$$

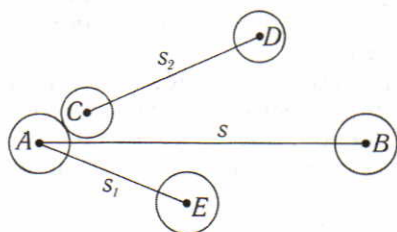


рис. 10.5

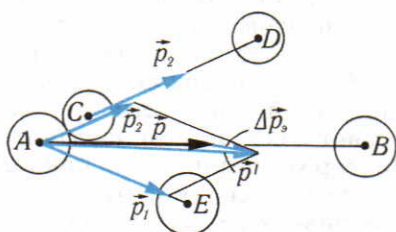


рис. 10.6

7. Постройте вектор $\vec{p}' = \vec{p}_1 + \vec{p}_2$, перенеся начало вектора $\vec{p}_2$ в точку А. Найдите разность векторов $\Delta \vec{p}_3 = \vec{p}' - \vec{p}$. Измерьте длину вектора $\Delta \vec{p}_3$ и по известному масштабу построения векторов импульса определите значение модуля вектора $\Delta \vec{p}_3$.

8. Определите границу погрешностей значений импульсов системы из двух монет до и после столкновения. Проверьте, лежит ли обнаруженное различие импульсов Δp_3 в пределах границ погрешностей измерений. Результаты измерений и вычислений занесите в отчетную таблицу.

Отчетная таблица

s , м	s_1 , м	s_2 , м	h , см	l , см	p , кг·м/с	p_1 , кг·м/с	p_2 , кг·м/с	p' , кг·м/с	Δp_3 , кг·м/с	μ	ϵ_p	$\Delta p_{\text{т}}$, кг·м/с

Указание. При оценке границ погрешностей измерений в данном эксперименте необходимо обратить внимание на тот факт, что при повторном запуске монеты из одного и того же места на наклонной плоскости пройденный путь по горизонтальной поверхности может заметно отличаться от первого результата. Различие результатов повторных опытов свидетельствует о существенном влиянии случайных факторов на результаты эксперимента. Такими факторами могут быть действие пальцев экспериментатора при запуске монеты, неровность поверхности бумаги и многое другое. Граница абсолютной систематической погрешности измерений пройденного пути имеет в данном эксперименте значение около 1 мм. Это значительно меньше наблюдаемых случайных отклонений, поэтому систематическими погрешностями измерений в данном случае можно пренебречь.

Для оценки границ случайных погрешностей можно выполнить серию из 10 измерений тормозного пути при одинаковых условиях запуска монеты, найти среднее арифметическое значение тормозного пути $s_{\text{ср}}$ и среднюю квадратичную погрешность.

Границы абсолютных погрешностей измерений пути s_1 и s_2 можно считать приблизительно равными границе абсолютной погрешности измерений первого тормозного пути: $\Delta s_1 = \Delta s_2 = \Delta s$.

Считая, что погрешности измерения массы и коэффициента трения пренебрежимо малы по сравнению со случайными погрешностями измерений пройденного пути, определите границу относительной погрешности измерения импульса.

Дополнительные задания: 1. Вычислите значения кинетической энергии системы из двух монет до столкновения и после столкновения и найдите их разность. Оцените границу погрешности измерений кинетической энергии и сделайте вывод, является ли процесс столкновения монет упругим ударом.

2. Оцените погрешность измерения коэффициента трения, для чего пять раз определите тангенс предельного угла трения.

3. Прodelайте опыт с двумя одинаковыми монетами. Проверьте, выполнится ли известный из теории результат, что при упругом нецентральной ударе двух тел одинаковой массы, из которых одно покоится, тела после удара разлетаются под прямым углом.

4. Измерение момента инерции тела

Оборудование: металлическое кольцо, весы, набор гирь, штангенциркуль, измерительная лента, секундомер, уровень, гладкая доска длиной около 1 м, полосы картона.

Задание: рассчитайте момент инерции кольца относительно оси вращения, проходящей через центр кольца перпендикулярно его плоскости, и определите на основе этих измерений момент инерции кольца. Сравните полученные значения моментов инерции.

Содержание и метод выполнения работы

Момент инерции кольца с внутренним радиусом r и внешним радиусом R можно рассчитать с помощью выражения для кинетической энергии вращающегося тела. Цилиндр радиусом R можно представить состоящим из двух тел: цилиндра радиусом r и кольца с внутренним радиусом r и внешним радиусом R . Очевидно, что при вращении большого цилиндра с угловой скоростью ω его кинетическая энергия равна сумме кинетических энергий малого цилиндра и кольца:

$$\frac{I_1 \omega^2}{2} = \frac{I_2 \omega^2}{2} + \frac{I_k \omega^2}{2}, \quad (1)$$

где I_1 — момент инерции большого цилиндра; I_2 — момент инерции малого цилиндра; I_k — момент инерции кольца. Из уравнения (1) следует:

$$I_k = I_1 - I_2 = \frac{m_1 R^2}{2} - \frac{m_2 r^2}{2}. \quad (2)$$

Массы цилиндров m_1 и m_2 можно выразить через плотность вещества ρ , их длину l и радиусы R и r :

$$m_1 = \pi R^2 l \rho, \quad (3)$$

$$m_2 = \pi r^2 l \rho. \quad (4)$$

Плотность вещества ρ можно найти по известным значениям массы m кольца и его объема $V = \pi l (R^2 - r^2)$:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{\pi l (R^2 - r^2)}. \quad (5)$$

Из уравнения (2) с учетом выражений (3)—(5) следует:

$$I_{\tau} = \frac{\pi \rho l (R^4 - r^4)}{2} = \frac{m (R^2 + r^2)}{2}. \quad (6)$$

Таким образом, измерив массу кольца и его внешний и внутренний радиусы, мы можем вычислить его момент инерции относительно оси, проходящей через центр кольца перпендикулярно его плоскости.

Для экспериментального определения момента инерции кольца можно осуществить следующий опыт. Установим гладкую доску длиной l под углом α к горизонту (рис. 10.7). Поставим кольцо на верхний край доски и измерим время t его скатывания. По закону сохранения энергии имеем

$$\frac{I\omega^2}{2} + \frac{mv^2}{2} = mgh = mgl \sin \alpha. \quad (7)$$

Но $\omega = v/R$, а конечная скорость $v = 2l/t$. Подставив в уравнение (7), после несложных преобразований получим

$$I = mR^2 \left(\frac{gt^2 \sin \alpha}{2l} - 1 \right). \quad (8)$$

Таким образом, для экспериментального определения момента инерции кольца оказывается необходимым измерить его массу, внешний радиус, время скатывания по наклонной плоскости, длину наклонной плоскости и угол ее наклона. Если высота подставки под наклонной плоскостью равна h , то $\sin \alpha = h/l$ и выражение (8) примет вид

$$I_s = mR^2 \left(\frac{ght^2}{2l^2} - 1 \right). \quad (9)$$

Порядок выполнения работы

1. Подготовьте весы для взвешивания и определите массу кольца. С помощью штангенциркуля определите внутренний и внешний радиусы кольца. Вычислите момент инерции по формуле (6).

2. Положите доску на стол и проверьте горизонтальность ее поверхности с помощью уровня или металлического шара. Если поверхность доски на столе не горизонтальна, то добейтесь горизонтального положения поверхности доски, подкладывая под один из ее концов полосы картона.

После этого подложите под второй конец доски карандаш или книгу и подберите такой угол наклона доски, при котором кольцо будет скатываться за 3—4 с.

3. Поставьте кольцо у верхнего края наклонной плоскости и отпустите его одновременно с запуском секундомера. При достижении кольцом края доски остановите секундомер. Запишите показания секундомера.

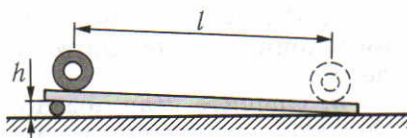


рис. 10.7

4. Измерьте длину доски и высоту подставки под ее верхним концом. Вычислите момент инерции кольца по формуле (9).

5. Оцените границы погрешностей измерений и вычислений момента инерции кольца. Находятся ли в согласии результаты расчета момента инерции по формуле (6) и результаты его экспериментального определения с применением формулы (9)?

Результаты измерений и вычислений занесите в отчетную таблицу.

Границы погрешностей измерений момента инерции при использовании формулы (6) можно оценить следующим образом:

$$\varepsilon_I = \varepsilon_m + \varepsilon_{R^2+r^2} = \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta(R^2+r^2)}{R^2+r^2}.$$

Оценка границ погрешностей измерения массы рассмотрена в лабораторной работе 1.

Абсолютная погрешность суммы квадратов радиусов имеет вид

$$\Delta(R^2+r^2) = \Delta(R^2) + \Delta(r^2) = 2R\Delta R + 2r\Delta r.$$

Пренебрегая погрешностью при измерении массы, получим

$$\varepsilon_I \approx \frac{2(R\Delta R + r\Delta r)}{R^2+r^2}.$$

Приняв абсолютную границу погрешностей измерений с помощью штангенциркуля равной $\Delta r = \Delta R = \delta = 0,1$ мм, получим

$$\varepsilon_I = \frac{2\delta(R+r)}{R^2+r^2}. \quad (10)$$

Границы погрешностей измерений при вычислении момента инерции по формуле (9) можно оценить следующим образом:

$$\varepsilon_I = \varepsilon_m + \varepsilon_{R^2} + \varepsilon_{k-1}, \text{ где } k = \frac{ght^2}{2l^2}.$$

Пренебрегая, как и прежде, погрешностью при измерении массы, получим

$$\varepsilon_I \approx \frac{2\Delta R}{R} + \frac{\Delta(k-1)}{k-1} = \frac{2\Delta R}{R} + \frac{\Delta k}{k-1}. \quad (11)$$

Но

$$\Delta k = k\varepsilon_k = k \left(\frac{\Delta g}{g} + \frac{\Delta h}{h} + \frac{2\Delta t}{t} + \frac{2\Delta l}{l} \right) = \frac{ght^2}{2l^2} \left(\frac{\Delta g}{g} + \frac{\Delta h}{h} + \frac{2\Delta t}{t} + \frac{2\Delta l}{l} \right). \quad (12)$$

Очевидно, что эту погрешность имеет смысл вычислить отдельно и затем уже подставить результат в выражение (11). Приняв $g = 9,81$ м/с², можно погрешностью $\frac{\Delta g}{g} \approx 0,04\%$ пренебречь, что упростит расчет.

Граница абсолютной погрешности измерений времени Δt складывается из границы инструментальной погрешности $\Delta t_{\text{пр}}$,

границы погрешности метода измерения Δt_m и границы погрешности отсчета $\Delta t_{\text{отсч}}$ (см. § 75):

$$\Delta t = \Delta t_{\text{пр}} + \Delta t_m + \Delta t_{\text{отсч}}.$$

Границу инструментальной погрешности механического секундомера можно принять равной 0,1 с, примерно такие же значения имеют границы погрешности отсчета и метода измерений, обусловленной ошибкой наблюдателя при запуске или остановке секундомера. Поэтому можно считать, что $\Delta t \approx 0,3$ с.

Границу абсолютной погрешности измерений высоты наклонной плоскости из-за малости измеряемого значения высоты можно считать приблизительно равной погрешности отсчета при измерении линейкой ($\Delta h = 1$ мм), а границу абсолютной погрешности измерения длины доски можно считать равной сумме границ инструментальной погрешности и погрешности отсчета:

$$\Delta l = \Delta l_{\text{пр}} + \Delta l_{\text{отсч}} = 1 \text{ см} + 0,5 \text{ см} = 1,5 \text{ см}.$$

Дополнительное задание: выведите формулу (9) для вычисления момента инерции кольца на основании второго закона Ньютона для поступательного и вращательного движения кольца.

Отчетная таблица

h , м	ρ , кг/м ³	D , м	σ , Н/м	ε_σ	$\Delta\sigma$, Н/м

5. Измерение давления газа

Оборудование: насос, работающий на разрежение, молочная бутылка с резиновой пробкой, стеклянная трубка длиной 40—60 см, закрытая с одного конца, сосуд с водой, линейка измерительная, резиновый шланг, зажим, манометр.

Задание: откачайте воздух из бутылки насосом. Измерьте давление воздуха в бутылке с помощью стеклянной трубки и сосуда с водой. Полученный результат проверьте прямым измерением давления воздуха манометром.

Содержание и метод выполнения работы

Для измерения разности давлений можно применить, например, трубчатый манометр. В этом приборе чувствительным элементом, соединяющимся с исследуемым объемом, является изогнутая трубка. При различии давлений изнутри и

снаружи трубка деформируется и вызывает через исполнительное устройство поворот стрелки прибора.

Разность Δp давления газа p в каком-то сосуде и атмосферного давления p_a можно измерить и с помощью жидкостного манометра, который состоит из двух вертикальных стеклянных трубок, соединенных внизу и открытых сверху. Трубки манометра заполняются жидкостью примерно до половины высоты. При одинаковом внешнем давлении на обе поверхности жидкости в двух коленях манометра уровни жидкости в них находятся на одинаковой высоте. Если же одну стеклянную трубку манометра соединить резиновым шлангом с сосудом, в котором газ находится под давлением p , отличным от давления p_a атмосферного воздуха, то уровни жидкости в трубках манометра окажутся расположенными на разной высоте. Разность h уровней жидкости в трубках манометра связана с разностью давлений на поверхности жидкости в них уравнением

$$\Delta p = p - p_a = \rho g h.$$

Если трубки манометра заполнены водой, то разность давлений в паскалях можно вычислить по разности уровней воды в сантиметрах. Если $h = 1$ см, то

$$\Delta p = 10^3 \text{ кг/м}^3 \cdot 9,81 \text{ м/с}^2 \cdot 10^{-2} \text{ м} \approx 100 \text{ Па},$$

т. е.

$$1 \text{ см вод. ст.} \approx 100 \text{ Па}.$$

При отсутствии приборов для измерения давления можно воспользоваться стеклянной трубкой, закрытой с одного конца. Для этого следует соединить эту трубку с сосудом, в котором нужно измерить давление газа, затем перекрыть соединительный резиновый шланг зажимом. Сняв конец резинового шланга с трубки в пробке сосуда, следует поместить конец стеклянной трубки вместе со шлангом в воду и под водой снять конец шланга со стеклянной трубки. Так как начальное давление воздуха внутри трубки ниже атмосферного, вода войдет в нее и поднимется на некоторую высоту h , при которой давление воздуха в трубке станет равным атмосферному. Процесс сжатия газа можно считать изотермическим, поэтому начальное давление в трубке, равное давлению в бутылке, определяется по закону Бойля—Мариотта:

$$p_1 = \frac{p_2 V_2}{V_1} = \frac{p_2 l_2}{l_1}, \quad (1)$$

где p_1 — начальное давление воздуха в трубке (т. е. давление в бутылке); V_1 — начальный объем; p_2 — конечное давление воздуха; V_2 — его конечный объем в трубке после подъема воды.

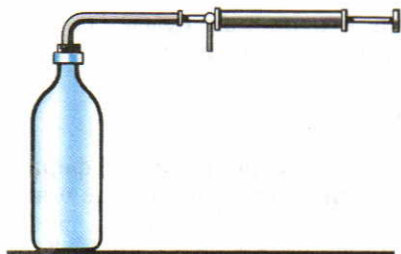


рис. 10.8

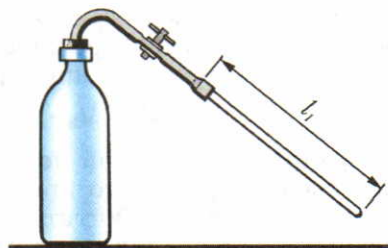


рис. 10.9

Конечное давление p_2 воздуха в трубке равно атмосферному давлению воздуха p_a минус давление p_3 водяного столба в трубке над поверхностью жидкости. Если этой поправкой можно пренебречь, то давление p_2 равно атмосферному давлению. Тогда для давления p_1 имеем

$$p_1 = \frac{p_a l_2}{l_1}. \quad (2)$$

Порядок выполнения работы

1. Измерьте длину стеклянной трубки l_1 .
2. Соедините резиновым шлангом насос на разрежение с трубкой в пробке сосуда (рис. 10.8). Сделайте 20 движений поршня насоса. Перекройте шланг зажимом.

3. Снимите конец шланга со штуцера насоса и присоедините его к открытому концу стеклянной трубки. Откройте зажим на шланге и снова перекройте его (рис. 10.9).

4. Опустите конец стеклянной трубки вместе со шлангом под воду и снимите шланг. Поставьте стеклянную трубку вертикально и измерьте длину l_2 воздушного столба (рис. 10.10).

5. Определите атмосферное давление p_a воздуха по показаниям барометра. Используя найденные значения длин воздушного столба l_1 и l_2 в стеклянной трубке и атмосферного давления p_a , вычислите давление p_1 в сосуде и трубке по формуле (2).

6. Оцените границы погрешностей измерений. Результаты измерений и вычисления занесите в отчетную таблицу.

Границы погрешностей измерений можно оценить следующим образом.

Из уравнения (2) следует:

$$\varepsilon_{p_1} = \varepsilon_{l_2} + \varepsilon_{l_1} + \varepsilon_{p_a}. \quad (3)$$

При измерениях длины воздушного столба линейкой с миллиметровыми делениями границу абсолютной погрешности измере-

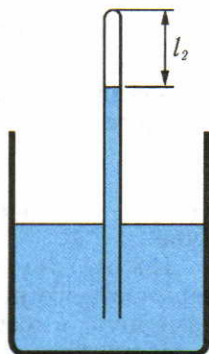


рис. 10.10

ний длины $\Delta l = \Delta l_1 = \Delta l_2$ можно считать равной сумме границ инструментальной погрешности и погрешности отсчета, каждая из которых равна примерно 1 мм:

$$\Delta l_1 = \Delta l_2 = \Delta l_{\text{пр}} + \Delta l_{\text{отсч}} \approx 2 \text{ мм.}$$

Границу абсолютной погрешности измерения атмосферного давления Δp_a можно принять равной цене одного деления шкалы барометра. (Учтите, что показания барометра часто заданы не в паскалях, а в миллиметрах ртутного столба. При расчетах следует учесть, что давление 1 мм рт. ст. равно 133,3 Па.)

Дополнительные задания: 1. Выведите соотношение между 1 мм рт. ст. и 1 Па.

2. Как учесть погрешность, вносимую в давление воздуха в бутылке, когда к ней присоединяются трубка и резиновый шланг?

Отчетная таблица

l_1 , м	l_2 , м	p_a , Па	Δp_a , Па	p_1 , Па	ε_p	Δp_1 , Па

6. Измерение поверхностного натяжения

Оборудование: капиллярная трубка, штангенциркуль, стальная или пластмассовая линейка с миллиметровыми делениями, прозрачный стакан с дистиллированной водой.

Задание: пронаблюдайте подъем уровня воды в капилляре и по высоте подъема вычислите поверхностное натяжение воды.

Содержание и метод выполнения работы

Высота подъема смачивающей жидкости в капилляре определяется поверхностным натяжением σ , плотностью жидкости ρ и радиусом капилляра r :

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g r} = \frac{4\sigma}{\rho g D},$$

где g — ускорение свободного падения; D — диаметр капилляра.

Из этого выражения следует, что для определения поверхностного натяжения смачивающей жидкости необходимо измерить высоту подъема жидкости известной плотности в капилляре известного радиуса.

Для измерения диаметра капилляра можно воспользоваться металлической иглой. Вдвинув иглу в капилляр до упора, можно пометить краской границу соприкосновения



рис. 10.11

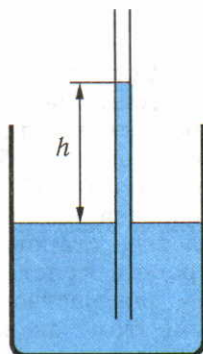


рис. 10.12

иглы с капилляром (рис. 10.11). Диаметр иглы на уровне этой границы можно принять за диаметр капилляра и измерить его с помощью штангенциркуля (лучше — микрометра).

Подъем дистиллированной воды в капилляре можно наблюдать, опустив капилляр в воду (рис. 10.12). Капиллярная трубка должна быть предварительно обезжирена и промыта дистиллированной водой.

Порядок выполнения работы

1. Измерьте радиус капилляра с помощью иглы и штангенциркуля (или микрометра).

2. Опустите конец капиллярной трубки в воду и измерьте высоту подъема воды.

3. Вычислите поверхностное натяжение воды. Результаты измерений и вычислений занесите в отчетную таблицу.

4. Оцените границу погрешностей измерений, приняв $\Delta h = 0,5$ мм и $\Delta r = 0,1$ мм.

Дополнительное задание: добавьте в воду немного мыла и измерьте поверхностное натяжение мыльного раствора.

Отчетная таблица

h , м	ρ , кг/м ³	D , м	σ , Н/м	ε_σ	$\Delta\sigma$, Н/м

7. Наблюдение процесса роста кристаллов из раствора

Оборудование: микроскоп школьный с 80-кратным увеличением, насыщенные растворы хлорида натрия, хлорида аммония, гипосульфита, предметные стекла, стеклянные палочки.

Задание: пронаблюдайте процесс роста кристаллов различных веществ в пересыщенном водном растворе.

Содержание и метод выполнения работы

Для получения пересыщенного водного раствора любого вещества необходимо создать условия для испарения воды соответствующего насыщенного раствора. Для этого, например, можно небольшое количество насыщенного раствора поместить на обезжиренную стеклянную пластину. Капля растекается по стеклу тонким слоем, вода быстро испаряется, раствор становится пересыщенным, начинается интенсивный процесс кристаллизации.

Для растворов некоторых веществ степень пересыщения при этом так велика, что образуются необычные для данного вещества ветвистые древовидные формы, называемые дендритами. Рост дендритов происходит следующим образом. Вершина кристалла соприкасается с раствором большей концентрации, чем боковые грани растущего кристалла. За счет этого создаются условия для более интенсивного роста вершины кристалла, она быстрее внедряется в пересыщенный раствор и обгоняет рост боковых граней.

Порядок выполнения работы

1. Поместите на столик микроскопа предметное стекло (рис. 10.13), не дотрагиваясь до его поверхности. Отрегулируйте освещение и добейтесь четкого изображения верхней поверхности предметного стекла. Наводку на резкость можно облегчить нанесением на верхнюю поверхность стекла метки карандашом или чернилами.

Внимание! При наводке на резкость вращение микрометрического винта микроскопа следует производить осторожно! Наблюдая сбоку, тубус микроскопа необходимо сначала опустить, не доводя его до соприкосновения с предметным стеклом, а затем, наблюдая в окуляр, осторожно перемещать вверх до получения четкого изображения.



рис. 10.13

2. Выньте предметное стекло, нанесите на него с помощью стеклянной палочки каплю насыщенного раствора хлорида аммония. Палочкой распределите каплю по стеклу.

3. Поместите стекло с каплей под объектив микроскопа так, чтобы в поле зрения находился край капли, так как первые кристаллы образуются обычно на ее краю.

4. Пронаблюдайте процесс зарождения и роста кристаллов.

5. Результаты наблюдений занесите в

отчет, который должен содержать краткое описание процесса роста кристаллов и зарисовку картины, видимой в микроскоп.

6. Пронаблюдайте аналогичные процессы с другими растворами.

8. Измерение удельной теплоты плавления льда

Оборудование: калориметр, термометр, цилиндр измерительный, сосуд с теплой водой, сосуд с водой и тающим льдом.

Задание: определите удельную теплоту плавления льда. (Удельная теплоемкость воды c равна $4,18 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.)

Содержание и метод выполнения работы

Определение переданного или полученного количества теплоты на основании измерений температуры требует осуществления теплообмена между двумя или более телами без совершения работы. Обычно для таких измерений используется калориметр.

Калориметр представляет собой два цилиндрических сосуда, радиус одного из них немного больше радиуса другого. Сосуд меньших размеров ставится внутрь второго на теплоизолирующую подставку. Между стенками сосудов находится воздух, являющийся хорошим теплоизолятором.

Во внутренний сосуд наливается жидкость, например керосин или вода. Если в жидкость опустить тело с температурой t_1 , которая выше температуры t_2 жидкости и калориметра, то между жидкостью и телом происходит теплообмен до установления теплового равновесия. При теплоизоляции от внешних тел и равенстве нулю работы внешних сил внутренняя энергия тел в калориметре в сумме не изменяется, следовательно, сумма количества теплоты Q_1 , полученного исследуемым телом, количества теплоты Q_2 , полученного жидкостью, и количества теплоты Q_3 , полученного внутренним сосудом калориметра, равна нулю. На этом основании составляется уравнение теплового баланса.

Порядок выполнения работы

1. Разбейте лед на кусочки небольших размеров и оставьте в чашке на 20—30 мин. Лед в воде в процессе таяния имеет температуру t_1 , равную 0°C .

2. Налейте в измерительный цилиндр 150 см^3 теплой воды при температуре примерно 40°C . Измерьте температуру t_3 теплой воды в цилиндре и перелейте эту воду во внутренний стакан калориметра. Измерьте температуру t_2 воздуха.

3. Куски тающего льда опускайте в калориметр с теплой водой. После опускания каждого куса льда ожидайте полного его расплавления и следите за показаниями термометра. Лед нужно добавлять до тех пор, пока температура воды в калориметре не опустится до значения t_2 , равного температуре окружающего воздуха.

В этом случае начальная и конечная температуры стакана калориметра одинаковы, стакан не получает и не отдает теплоту. Следовательно, в уравнение теплового баланса входят только количество теплоты, идущей на плавление льда: $Q_1 = \lambda m_1$, количество теплоты, идущей на нагревание воды, образовавшейся в результате таяния льда: $Q_2 = m_1 c (t_2 - t_1)$, и количество теплоты, выделяющейся при остывании теплой воды: $Q_3 = m_2 c (t_2 - t_3)$.

Уравнение теплового баланса имеет вид

$$m_1 \lambda + m_1 c (t_2 - t_1) + m_2 c (t_2 - t_3) = 0,$$

где c — удельная теплоемкость воды; m_1 — масса льда; m_2 — масса теплой воды.

Массу льда можно определить, перелив в измерительный цилиндр воду из калориметра после завершения эксперимента. Объем воды, образовавшейся в результате таяния льда, равен разности объемов всей воды и теплой воды:

$$V_1 = V_2 - V_3.$$

Масса льда равна $m_1 = V_1 \rho$.

4. Вычислите удельную теплоту плавления льда:

$$\lambda = \frac{m_2 c (t_3 - t_2) - m_1 c (t_2 - t_1)}{m_1}.$$

5. Оцените границы погрешностей измерений и вычислений. Результаты измерений и вычислений занесите в отчетную таблицу.

Отчетная таблица

V_1 , м ³	V_2 , м ³	V_3 , м ³	m_1 , кг	m_2 , кг	t_1 , °C	t_2 , °C	t_3 , °C	λ , Дж/кг	$\Delta \lambda$, Дж/кг

Расчет погрешности:

$$\Delta \lambda = \Delta a + \Delta b, \text{ где } a = \frac{m_2}{m_1} c (t_3 - t_2),$$

$$b = c (t_2 - t_1).$$

Далее,

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta m_2}{m_2} + \frac{\Delta m_1}{m_1} + \frac{2 \Delta t}{t_3 - t_2};$$

$$\Delta a = \varepsilon_a a, \quad \Delta b = 2 c \Delta t.$$

9. Измерение электроемкости конденсатора

Оборудование: гальванометр, источник электропитания ИЭПП-2, вольтметр 15 В, батарея конденсаторов 8 мкФ, конденсатор неизвестной электроемкости.

Задание: исследуйте зависимость отброса стрелки гальванометра от электрического заряда, протекающего через его рамку. Измерьте электроемкость конденсатора путем измерения его заряда и напряжения между обкладками.

Содержание и метод выполнения работы

При прохождении постоянного электрического тока через рамку прибора магнитоэлектрической системы момент сил Ампера, действующих на рамку, пропорционален силе тока. Повороту рамки противодействуют силы упругости спиральных пружин, возрастающие пропорционально углу поворота стрелки прибора. В результате угол отклонения стрелки оказывается пропорциональным силе тока в рамке прибора.

Иной результат получается при кратковременном прохождении электрического тока через рамку прибора магнитоэлектрической системы. Если время Δt протекания электрического тока через рамку прибора значительно меньше периода свободных колебаний его подвижной системы, то такое кратковременное прохождение тока действует как короткий толчок, вызывающий свободные колебания подвижной системы прибора. Амплитуда A этих колебаний, с одной стороны, пропорциональна силе Ампера F , возникающей при прохождении электрического тока в рамке, с другой — времени Δt действия этой силы:

$$A \sim F \Delta t.$$

Сила Ампера пропорциональна силе тока в рамке прибора, поэтому амплитуда колебаний стрелки пропорциональна силе тока и времени протекания этого тока, т. е. электрическому заряду, прошедшему через рамку:

$$A \sim \Delta q.$$

Метод измерения электрического заряда по отбросу стрелки прибора магнитоэлектрической системы называется баллистическим методом.

Для измерения заряда баллистическим методом нужно отградуировать гальванометр. Для этого можно зарядить конденсатор известной электроемкости до некоторого напряжения, затем отключить конденсатор от источника тока и подключить его выводы к гальванометру. Заметив число

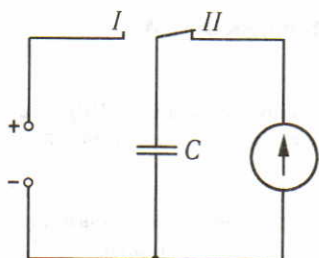


рис. 10.14

делений шкалы n , на которое произошел отброс стрелки, и вычислив заряд по формуле $\Delta q = CU$, можно найти коэффициент пропорциональности между числом делений шкалы гальванометра и электрическим зарядом, прошедшим через рамку прибора:

$$kn = \Delta q, \quad k = \frac{\Delta q}{n}.$$

Порядок выполнения работы

1. Соберите электрическую цепь по рисунку 10.14. Включите источник питания ИЭПП-2 и с помощью ручки регулировки подайте на выход прибора напряжение 2 В.

2. Установите переключатель батареи конденсаторов в положение 1 мкФ. С помощью переключателя сначала подключите выводы батареи конденсаторов к выходу источника питания ИЭПП-2, а затем переключите их на выводы гальванометра. Заметьте показания гальванометра — число n делений шкалы при максимальном отклонении стрелки. Опыт повторите 3—5 раз, найдите среднее значение числа n_1 .

3. Увеличивайте напряжение ступенями по 2 В и производите измерения числа делений шкалы n_2, n_3 и т. д. до напряжения 12 В. Результаты измерений занесите в отчетную таблицу.

4. Постройте график зависимости числа n делений шкалы гальванометра от заряда Δq . Определите по графику коэффициент k .

5. Включите в схему вместо батареи конденсаторов конденсатор неизвестной емкости. Заряжая конденсатор и разряжая его через гальванометр, выберите такое напряжение U , при котором отброс стрелки достигает примерно 20 делений шкалы гальванометра. По измеренному напряжению и значению электрического заряда определите емкость конденсатора.

Дополнительное задание: спланируйте и выполните эксперимент, которым подтверждается независимость коэффициента k для данного гальванометра от емкости используемого конденсатора.

Отчетная таблица

U , В	Δq , Кл	n , дел

10. Измерение силы тока и напряжения

Оборудование: источник постоянного тока 4—10 В, резистор 5—10 Ом, вольтметр 10—15 В, амперметр 2 А.

Задание: измерьте напряжение на выходе источника постоянного тока. Рассчитайте силу тока в цепи при включении имеющегося в комплекте оборудования резистора. Соберите электрическую цепь из источника тока, резистора, амперметра и вольтметра, выполните измерения силы тока в цепи и напряжения на резисторе. Сравните результаты расчета и измерений, сделайте выводы.

Содержание и метод выполнения работы

При измерениях силы тока и напряжения на участке цепи возникают принципиальные трудности, связанные со взаимным влиянием вольтметра и амперметра при одновременном их включении в электрическую цепь. Возможны два способа включения амперметра и вольтметра в электрическую цепь.

Если вольтметр и амперметр включены в электрическую цепь по схеме, представленной на рисунке 10.15, то вольтметр измеряет напряжение на резисторе R , но амперметр измеряет сумму сил токов в параллельно включенных резисторе и вольтметре. Сила тока через вольтметр V определяется при известном значении его сопротивления R_v по измеряемому напряжению на его зажимах с помощью закона Ома.

Если вольтметр и амперметр включены в электрическую цепь по схеме, представленной на рисунке 10.16, то амперметр измеряет силу тока в резисторе, но вольтметр измеряет сумму напряжений на резисторе и амперметре. Для определения напряжения на резисторе в этом случае нужно знать сопротивление амперметра R_a и определить напряжение на нем по закону Ома.

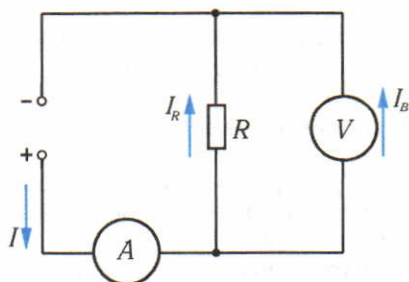


рис. 10.15

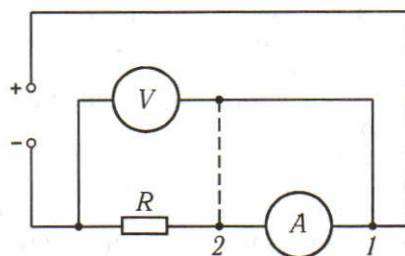


рис. 10.16

На практике внесение поправок в связи с взаимными влияниями амперметра и вольтметра довольно часто не является необходимым из-за их относительной малости.

Чтобы проверить, является ли погрешность метода пренебрежимо малой при использовании данного комплекта приборов по схеме рисунка 10.16, достаточно посмотреть, заметны ли изменения показаний вольтметра при переключении одного его вывода из точки 1 в точку 2. При использовании схемы по рисунку 10.15 нужно проверить, заметны ли изменения показаний амперметра при отключении вольтметра.

Порядок выполнения работы

1. Измерьте напряжение U на выходе источника постоянного тока с помощью вольтметра. Рассчитайте силу тока I_r в цепи при подключении имеющегося резистора с известным электрическим сопротивлением R . В расчете можно принять, что внутреннее сопротивление источника тока пренебрежимо мало по сравнению с сопротивлением вольтметра и электрическим сопротивлением резистора.

2. Соберите электрическую цепь из источника постоянно-го тока, резистора и амперметра (см. рис. 10.15). Измерьте силу тока I_o в цепи.

3. Оцените границы погрешностей измерений и вычислений. Граница абсолютной погрешности измерения напряжения равна сумме границ абсолютной инструментальной погрешности измерительного прибора и абсолютной погрешности отсчета.

Граница относительной погрешности вычисления силы тока по закону Ома для участка цепи равна сумме относительных погрешностей измерения напряжения и электрического сопротивления. Однако значение электрического сопротивления резистора в данном эксперименте можно считать известным с высокой точностью, тогда относительная погрешность измерения силы тока будет равна относительной погрешности напряжения.

4. Сравните расчетное I_r и измеренное I_o значения силы тока в цепи. Сделайте вывод о том, согласуются ли эти результаты.

5. Результаты измерений и вычислений занесите в отчетную таблицу.

Дополнительное задание: проверьте, есть ли необходимость учитывать влияние сопротивления амперметра на результаты измерений в данном опыте. Проверьте, можно ли в данном эксперименте считать внутреннее сопротивление источника тока пренебрежимо малым по сравнению с электрическим сопротивлением внешнего участка цепи.

U , В	R , Ом	I_T , А	ΔU , В	ΔI_T , А	I_3 , А	ΔI_3 , А

11. Измерение электрического сопротивления

Оборудование: омметр, амперметр, вольтметр, источник постоянного тока, электрическая лампа.

Задание: используя предложенное оборудование, выполните измерения электрического сопротивления нити лампы накаливания.

Содержание и метод выполнения работы

Электрическим сопротивлением R участка электрической цепи называется производная физическая величина, равная отношению напряжения U на участке цепи к силе тока I в цепи:

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

Электрическое сопротивление участка цепи можно определить, измерив силу тока I в цепи и напряжение U на участке цепи.

Электрическое сопротивление часто измеряют специальным измерительным прибором — омметром.

Принцип действия омметра основан на использовании источника тока с постоянным значением напряжения и микроамперметра со специально проградуированной шкалой.

Микроамперметр включается последовательно с источником тока и резистором R_0 (рис. 10.17). Значение электрического сопротивления этого резистора таково, что стрелка измерительного прибора отклоняется до крайнего правого деления шкалы, если клеммы прибора замкнуть накороток.

Это деление принимается за нулевое деление шкалы омметра. При включении между клеммами 1, 2 (выводами омметра) резистора с некоторым электрическим сопротивлением R сила тока в цепи омметра уменьшается. Шкала омметра градуируется таким образом, что по отклонению стрелки омметра можно определить значение электрического сопротивления резистора, включенного последовательно с омметром.

При использовании в омметре в ка-

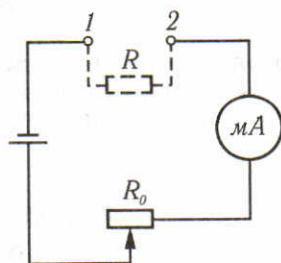


рис. 10.17

честве источника постоянного тока батареи гальванических элементов напряжение на выходе батареи со временем изменяется. Для поддержания постоянного значения напряжения в измерительной цепи в омметре имеется переменный резистор R_0 . Перед выполнением измерений с помощью омметра необходимо проверить установку нуля прибора. С этой целью выводы омметра закорачиваются (соединяются друг с другом). Стрелка прибора при этом должна установиться на нулевом делении.

Если стрелка омметра уходит вправо или влево от нулевого деления шкалы, необходимо вращением ручки «Установка нуля» установить стрелку на нуль.

Абсолютную погрешность измерений с помощью омметра можно считать примерно равной цене деления шкалы в той ее части, где производится отсчет показаний.

Порядок выполнения работы

1. Соберите электрическую цепь из источника постоянного тока, электрической лампы, вольтметра и амперметра. Подайте на лампу ее номинальное напряжение. Снимите показания амперметра и вольтметра и вычислите электрическое сопротивление нити лампы.

2. Оцените границы погрешностей измерений электрического сопротивления лампы с помощью вольтметра и амперметра.

3. Измерьте электрическое сопротивление нити лампы с помощью омметра и оцените границы погрешностей измерений.

4. Сравните результаты измерений электрического сопротивления разными методами и сделайте вывод.

Дополнительные задания: 1. По результатам измерений электрического сопротивления нити лампы в холодном и горячем состоянии оцените температуру светящейся нити лампы. Температурный коэффициент электрического сопротивления вольфрама $\alpha = 5,8 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

2. Меняя напряжение на лампе от нуля до номинального значения и регистрируя каждый раз силу тока, постройте вольт-амперную характеристику лампы накаливания (по 5—7 точкам). Как объяснить нелинейность характеристики? Справедлив ли для лампы накаливания закон Ома?

12. Измерение ЭДС и внутреннего сопротивления источника тока

Оборудование: источник постоянного тока, вольтметр, амперметр, два резистора, соединительные провода.

Задание: вычислите ЭДС и внутреннее сопротивление источника постоянного тока по результатам измерений силы тока в цепи и напряжения на участке цепи.

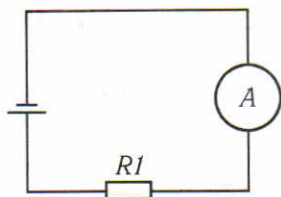


рис. 10.18

Содержание и метод выполнения работы

Согласно закону Ома для полной цепи ЭДС источника, его внутреннее сопротивление, сила тока в цепи и сопротивление внешней цепи связаны соотношением

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}.$$

Если к исследуемому источнику тока подключать поочередно два резистора с разными сопротивлениями, то, измеряя при этом силу тока в обоих случаях, можно записать два уравнения, из которых легко вычислить ЭДС и внутреннее сопротивление источника:

$$I_1 = \frac{\mathcal{E}}{R_1 + r} \text{ и } I_2 = \frac{\mathcal{E}}{R_2 + r}.$$

Решая совместно эти уравнения, получим

$$I_1 R_1 + I_1 r = I_2 R_2 + I_2 r; \quad r = \frac{I_2 R_2 - I_1 R_1}{I_1 - I_2};$$

$$\mathcal{E} = I_1 (R_1 + r) \text{ или } \mathcal{E} = I_2 (R_2 + r).$$

Порядок выполнения работы

1. Соберите электрическую цепь с резистором R_1 по схеме, представленной на рисунке 10.18. Измерьте силу тока.
2. Замените резистор R_1 на резистор R_2 и измерьте новую силу тока.
3. Вычислите внутреннее сопротивление источника тока и его ЭДС.
4. Отключите от источника тока резистор и амперметр. Подключите вольтметр к источнику тока и снимите его показания.

Сделайте вывод, согласуются ли между собой результаты вычисления ЭДС источника и результаты прямых измерений напряжения на выходе источника. Результаты измерений и вычислений занесите в отчетную таблицу. Оцените границы погрешностей измерений.

Отчетная таблица

I_1 , А	I_2 , А	R_1 , Ом	R_2 , Ом	r , Ом	$\mathcal{E}$, В	Δr , Ом	$\Delta \mathcal{E}$, В

13. Измерение магнитной индукции

Оборудование: постоянный магнит, катушка с известным числом витков, микроамперметр, омметр, вольтметр, конденсатор, источник постоянного тока, линейка измерительная, ключ.

Задание: измерьте магнитную индукцию вблизи полюса постоянного магнита.

Содержание и метод выполнения работы

Индукцию магнитного поля можно измерить, используя явление электромагнитной индукции. ЭДС индукции в замкнутом контуре равна по модулю скорости изменения магнитного потока через контур:

$$|\mathcal{E}_{\text{инд}}| = N \left| \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right|, \quad (1)$$

где N — число витков в контуре.

Разделив обе части уравнения (1) на значение R электрического сопротивления контура, получаем

$$I = \frac{N\Delta\Phi}{R\Delta t}. \quad (2)$$

Если быстро выдернуть катушку из магнитного поля, то через нее пройдет электрический заряд

$$\Delta q = I\Delta t = \frac{N\Delta\Phi}{R}. \quad (3)$$

В данном случае начальный магнитный поток $\Phi = BS$, конечный магнитный поток равен нулю и $\Delta\Phi = BS$, где S — площадь контура. Итак,

$$\Delta q = \frac{NBS}{R}, \quad (4)$$

откуда искомое значение магнитной индукции

$$B = \frac{\Delta q R}{NS}. \quad (5)$$

Значение заряда Δq определяется по баллистическому методу (см. лабораторную работу 9).

Порядок выполнения работы

1. Соедините выводы катушки с клеммами микроамперметра. Введите магнит внутрь катушки. Быстро удалите магнит из катушки и заметьте максимальное отклонение стрелки прибора. Повторите эксперимент 5 раз и найдите среднее значение.

2. Включите микроамперметр, вольтметр, конденсатор, источник постоянного тока и ключ по схеме, представленной на рисунке 10.14. Поставив ключ в положение I , зарядите конденсатор до напряжения 1 В. Отключите конденсатор от источника тока и подключите его к выводам микроамперметра — положение II ключа. Заметьте максимальное отклоне-

ние стрелки микроамперметра при переключении. Изменяя напряжение на конденсаторе, найдите такое его значение U , при котором максимальное отклонение стрелки будет таким же, как в опыте с удалением магнита из катушки.

В этом случае электрический заряд конденсатора равен заряду, протекающему в цепи катушки. Вычислите этот заряд Δq :

$$\Delta q = UC, \quad (6)$$

где U — напряжение на конденсаторе; C — электроемкость конденсатора.

3. Измерьте электрическое сопротивление R катушки, сопротивление микроамперметра определите по его паспорту.

4. Измерьте площадь поперечного сечения магнита и вычислите магнитную индукцию B у его полюсов.

5. Оцените границы погрешностей измерений. Результаты измерений и вычислений занесите в отчетную таблицу.

Отчетная таблица

U , В	C , Ф	Δq , Кл	R , Ом	N	Φ , Вб	S , м ²	B , Тл	ϵ_B	ΔB , Тл

14. Измерение электрического заряда одновалентного иона

Оборудование: стеклянный стакан со слабым раствором соляной кислоты, пробирка градуированная, источник постоянного тока, миллиамперметр, соединительные провода, два электрода, секундомер.

Задание: измерьте электрический заряд иона атомарного водорода.

Содержание и метод выполнения работы

При пропускании электрического тока через раствор соляной кислоты у катода выделяется водород, а у анода — хлор. Газообразный водород можно собрать в градуированную пробирку и измерить его объем V при нормальном давлении. По значению объема можно найти число N молекул водорода.

При одинаковых значениях давления и температуры объем прямо пропорционален числу молекул газа. Поэтому отношение числа молекул в одном моле газа к числу молекул в другом количестве газа равно отношению объема одного моля газа к объему этого газа:

$$\frac{N_A}{N} = \frac{V_M}{V}.$$

Отсюда число N молекул водорода в объеме V , измеренном в кубических сантиметрах, равно:

$$N = \frac{N_A V}{V_M} = \frac{6,02 \cdot 10^{23} \cdot V}{22,4 \cdot 10^3 \text{ см}^3} \quad (1)$$

Так как молекула водорода H_2 образуется из двух атомов водорода, то число ионов водорода в два раза больше числа молекул водорода. Поэтому заряд одного иона водорода равен:

$$e = \frac{q}{2N} = \frac{It}{2N} \quad (2)$$

Порядок выполнения работы

1. Заполните градуированную пробирку слабым раствором соляной кислоты до верхнего края. Прикройте пробирку маленьким листком бумаги, переверните вверх дном, опустите в стакан со слабым раствором кислоты и удалите листок бумаги.

2. Введите внутрь пробирки конец проводника без изоляции. Остальная часть проводника должна быть покрыта изоляцией. Соедините второй конец проводника с отрицательным полюсом источника постоянного тока. Конец второго проводника, соединенного с положительным полюсом источника тока, опустите в раствор соляной кислоты вне пробирки (рис. 10.19).

3. Включите источник тока. Регулируя напряжение на выходе источника тока, установите силу тока в цепи 50—100 мА и включите секундомер.

4. Наблюдайте за выделением газообразного водорода в пробирке и поддерживайте силу тока в цепи неизменной. При достижении значения объема водорода в пробирке около 10 см^3 остановите секундомер и определите время электролиза.

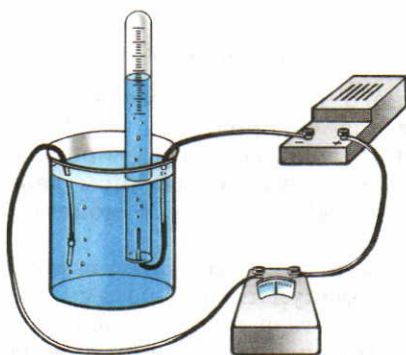


рис. 10.19

5. По формуле (1) найдите число молекул водорода в пробирке. По измеренным значениям силы тока I в цепи, времени t электролиза и найденному значению числа N молекул водорода вычислите заряд иона атомарного водорода по формуле (2).

Оцените границы погрешностей измерений и вычислений. Результаты измерений и вычислений занесите в отчетную таблицу.

Сравните полученный результат с табличным значе-

нием элементарного электрического заряда и сделайте вывод.

Граница абсолютной погрешности измерений силы тока складывается из границ погрешности прибора и погрешности отсчета (см. § 75).

Граница относительной погрешности измерения времени в данном эксперименте так мала, что ею можно пренебречь.

Границу абсолютной погрешности измерения объема газа можно принять равной цене деления на шкале пробирки.

Отчетная таблица

$V, \text{ см}^3$	N	$I, \text{ А}$	$t, \text{ с}$	$e, \text{ Кл}$	ϵ_e	$\Delta e, \text{ Кл}$



ОТВЕТЫ К ЗАДАЧАМ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

1.1. $t = 6$ с.

1.2. $a = \frac{4\pi^2}{T^2} r = \frac{4\pi^2}{T^2} R \cos \varphi$; $a_n = 0$; $a_g = 0,034$ м/с²; $a_M = 0,034 \cdot \cos 56^\circ \approx 0,019$ м/с².

1.3. $v_{\min} = 30$ м/с; $R_{\max} = 1000$ м.

1.4. $v = 2u$.

1.5. $a_t = 0,5$ м/с²; $a_n = 6,43$ м/с²; $a = 6,45$ м/с².

1.6. $R_A = 2,5$ м.

1.7. $t = 7,46$ с; $H = 278$ м.

1.8. Траектория-циклоида:

$$\begin{cases} x = vt - R \sin \frac{v}{R} t, \\ y = R \left(1 - \cos \frac{v}{R} t \right). \end{cases}$$

2.1. 50 м.

2.3. $\alpha = \arctg \frac{v_2}{v_1}$; $s = \sqrt{v_1^2 + v_2^2} \frac{l}{v_2}$.

2.4. $\approx 13,7$ с.

2.5. В первом $s_1 = 175$ м; $s_2 = 125$ м; $s_1 > s_2$.

3.1. 24 Н.

3.2. $a = 0$ м/с²; $F_{\text{упр}} = 2$ Н.

3.5. 50 м.

3.6. $\mu = 0,12$.

3.7. $2,7$ м/с².

3.8. $\alpha = \arctg 2\mu$.

4.2. $T^2 \sim R^3$; $T \sim R^2$.

4.3. $m_C = 2 \cdot 10^{30}$ кг.

4.4. $m_M = 6,6 \cdot 10^{23}$ кг.

4.5. Двигатели выбрасывают струю в сторону Луны; $P = 0,17$ Н.

5.2. $\Delta P = 0,068$ Н.

5.3. $F_{\text{упр}} = 40$ Н; $\alpha = 75,5^\circ$.

5.4. $0,0017$ рад $\approx 6'$.

5.5. $1,4$ ч.

5.6. $\alpha \approx 76^\circ$.

5.7. $y = \frac{\omega^2}{2g} x^2$. Параболоид вращения (ω — угловая скорость вращения сосуда).

6.1. а) $I_{O_0} = \frac{1}{2} m R^2$; б) $I_{O_1 O_1} = \frac{3}{2} m R^2$; в) $I_{O_2 O_2} = \frac{1}{3} m l^2$.

6.2. $I = \frac{m(g - \varepsilon R) R}{\varepsilon} = 22,5$ кг $\cdot$ м².

6.3. $\varepsilon = \frac{2(FR - M)}{mR^2} = 625$ с⁻².

6.4. $a_1 = a_2 = \frac{(m_2 - m_2)g}{m_1 + m_2 + \frac{m_0}{2}}$; $F_{H1} = 2m_2g = \frac{2m_2 + \frac{m}{2}}{m_1 + m_2 + \frac{m_0}{2}}$; $F_{H2} = m_2g = \frac{2m_1 + \frac{m}{2}}{m_1 + m_2 + \frac{m_0}{2}}$.

6.5. $N = \frac{mR\omega}{2\mu t}$.

6.6. $\omega R < v$.

7.1. $N_1 = 1200$ Н; $N_2 = 200$ Н.

7.2. $F_H \approx 0,29$ Н; $N \approx 1,01$ Н.

7.3. $N_1 = \frac{\mu_2 mg}{1 + \mu_1 \mu_2}$; $N_2 = \frac{mg}{1 + \mu_1 \mu_2}$; $\varphi = \arctg \frac{1 - \mu_1 \mu_2}{2\mu_2}$; $F_{\text{тр1}} = \frac{\mu_1 \mu_2 mg}{1 + \mu_1 \mu_2}$;

$F_{\text{тр2}} = \frac{\mu_2 mg}{1 + \mu_1 \mu_2}$.

7.4. $\sin \varphi_{\max} = \frac{r^2 l}{R(R^2 - r^2)}$.

8.1. $a = \frac{\mu u - (m - \mu t)g}{m - \mu t} = 17,3$ м/с².

8.2. $m = m_0 \left(1 - e^{\frac{u}{v}} \right) = 8,65 \cdot 10^5$ кг.

8.3. 250 м/с.

8.4. $\vec{v}_T = -\frac{m_2 \vec{v}}{m_1 + m_2}$; $v_T = 2$ м/с.

8.5. $\mu = \frac{m(a + g)}{u} = 3,25 \cdot 10^3$ кг/с.

9.1. $\frac{v_{\max}}{v_{\min}} = 59$.

9.2. $\frac{v_2}{v_1} = \frac{I + 2mR_1^2}{I + 2mR_2^2} = 4,3$. Частота

вращения человека увеличит-
ся в 4,3 раза.

$$9.3. \omega = \frac{2m_1 R_1 v_1}{m_2 R_2^2 + 2m_1 R_1^2} = 0,08 \text{ с}^{-1}.$$

10.1. За счет уменьшения кинети-
ческой энергии самолета.

$$10.2. \mu = \frac{h}{l} = 0,2.$$

$$10.4. 400 \text{ м/с}.$$

$$10.5. 90^\circ.$$

$$10.6. \approx 0,5 \text{ м}.$$

$$10.7. l = R \sqrt{1 + \frac{2g_l R}{v_0^2}} \approx 2,45 \cdot 10^6 \text{ м}.$$

$$11.1. V_{H_2} = 2 \text{ дм}^3.$$

$$11.2. 2 \text{ дм}^3.$$

$$13.1. 4,4 \cdot 10^{21}.$$

$$13.2. 3,3 \cdot 10^{24}.$$

$$13.3. 11,1 \text{ моль}.$$

$$13.4. 1,04 \cdot 10^{-9} \text{ моль}.$$

$$13.5. 3 \cdot 10^{-10} \text{ м}.$$

$$13.6. l = 6,7 \cdot 10^{-8} \text{ м}; d = 3,5 \cdot 10^{-11} \text{ м}.$$

Молекула имеет форму ци-
линдра.

$$13.7. m_{H_2} = 3,3 \cdot 10^{-27} \text{ кг};$$

$$m_{O_2} = 5,3 \cdot 10^{-26} \text{ кг}.$$

$$13.8. 2 \cdot 10^3.$$

$$15.1. 5,4 \text{ кПа}.$$

$$15.2. 10^{-21} \text{ Па}.$$

$$15.3. E_k = 5 \cdot 10^{-21} \text{ Дж}.$$

$$15.4. \frac{p_1}{p_2} = \frac{1}{2}.$$

$$15.5. 3 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-3}.$$

$$16.1. \frac{v_{H_2}}{v_{O_2}} = \sqrt{\frac{M_{O_2}}{M_{H_2}}} = 4.$$

$$16.2. n = 3,6 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}.$$

$$16.3. p \approx 83 \text{ Па}; \rho = 1,7 \cdot 10^{-6} \text{ кг/м}^3.$$

$$17.1. x_1 = 200 \text{ К}; x_2 = 2 \text{ м}^3; x_3 = 2 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

$$x_4 = 2,8 \cdot 10^{-2} \text{ кг/моль}; x_5 = 4,4 \text{ кг}.$$

$$17.2. 240 \text{ К}.$$

$$17.3. 4,1 \cdot 10^7 \text{ Па}.$$

$$17.4. 3,37 \text{ м}^3.$$

$$17.5. 252 \text{ кг}.$$

$$17.6. 2 \cdot 10^{-6} \text{ кг}; M \approx 4 \cdot 10^{-2} \text{ кг/моль}.$$

17.7. Аргон.

$$17.8. M = 8,4 \cdot 10^{-2} \text{ кг/моль}; \text{криптон}.$$

$$17.9. n = \frac{\lg \frac{p_2}{p_1}}{\lg \frac{V+V_0}{V}}.$$

17.10. Объем пузырька увеличится
в 3,16 раза.

$$17.11. 2617 \text{ К} = 2344 \text{ }^\circ\text{C}.$$

$$17.12. 1,16 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

$$17.13. 2210 \text{ кг}.$$

$$17.14. 333 \text{ К}.$$

$$17.15. 900 \text{ К}.$$

$$17.16. T \sim \frac{b}{V^{n-1}}$$

$$\begin{cases} n=1, T - \text{const}, \\ n>1, T \text{ уменьшается}, \\ n<1, T \text{ увеличивается}. \end{cases}$$

$$17.17. p = \frac{p_1 V_1 + p_2 V_2}{V_1 + V_2}.$$

$$17.18. 110 \text{ кг}; 4370 \text{ К}.$$

$$17.19. 1,02 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

$$17.20. \frac{p}{p_0} = \frac{3}{2}.$$

$$17.21. m = \frac{\nu R \Delta T}{hg} - \frac{p_0 S}{g}.$$

$$17.22. V = \frac{RT_0}{p_0} = 2,24 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3.$$

$$18.4. V_2 > V_1.$$

$$18.5. v_1 > v_2.$$

19.1. Число столкновений увели-
чится в 2 раза.

$$19.2. 1,7 \cdot 10^{-15} \text{ Па}; \approx 3 \cdot 10^{13} \text{ м}; 1,6 \times 10^{10} \text{ с}.$$

$$19.3. \approx 10^{-2} \text{ Па}.$$

$$21.1. \frac{m_0}{m} = 2,9 \cdot 10^{-3}.$$

$$21.2. 4,6 \text{ кг}.$$

$$21.3. 1,75 \cdot 10^{-2} \text{ кг}.$$

$$21.4. 0,61 \text{ кг}.$$

$$21.5. 99,6\%.$$

$$21.6. 11,6\%.$$

$$21.7. 16 \text{ }^\circ\text{C}.$$

$$21.8. 44\%.$$

$$22.1. 1,37 \cdot 10^{-5} \text{ Дж}.$$

$$22.2. A = \frac{\pi d^2 \sigma}{4} = 9,2 \cdot 10^{-21} \text{ Дж}; \frac{A}{E_k} = 1,5.$$

$$22.3. \frac{S_1}{S_2} = 1,26.$$

$$22.4. а) \frac{E_{\text{пов}}}{E} = 0,4; б) \frac{E_{\text{пов}}}{E} = 1,6.$$

$$23.1. 0,7 \text{ м.}$$

$$23.2. \approx 6,1 \text{ см.}$$

$$23.3. 0,063 \text{ Н/м.}$$

$$25.1. 6 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

$$25.2. 142 \text{ Н.}$$

$$25.3. 10^{-2} \text{ Дж.}$$

$$25.4. 2 \cdot 10^{-5} \text{ м; } 2 \cdot 10^{-6}.$$

$$25.5. 250 \text{ м.}$$

$$25.6. 1,95 \cdot 10^{-2} \text{ м.}$$

$$25.7. 15.$$

$$25.8. 7,4 \cdot 10^3 \text{ м.}$$

$$28.1. 1,58 \cdot 10^3 \text{ Дж.}$$

$$28.2. 41,5 \text{ Дж.}$$

$$28.3. \Delta U = 2,5 \text{ кДж.}$$

$$28.4. \Delta U = 1,49 \cdot 10^4 \text{ Дж.}$$

$$28.5. 2,19 \cdot 10^5 \text{ Па; } 328 \text{ Дж.}$$

$$29.1. \Delta U = 2500 \text{ Дж.}$$

$$29.2. 150 \text{ Дж.}$$

$$29.3. 300 \text{ Дж.}$$

$$29.4. 100 \text{ Дж.}$$

$$29.5. 600 \text{ Дж.}$$

$$29.6. -10^4 \text{ Дж.}$$

$$30.1. 1,9 \cdot 10^3 \text{ Дж.}$$

$$30.2. 322 \text{ К.}$$

$$30.3. \Delta T = 96 \text{ К.}$$

$$30.4. 9 \cdot 10^3 \text{ Дж.}$$

31.1. Работа при изотермическом расширении больше работы при адиабатном расширении.

$$31.2. 4 \cdot 10^8 \text{ Дж.}$$

$$31.3. 2,1 \text{ кДж.}$$

$$31.4. \Delta Q = \Delta p \Delta V = 2 \text{ кДж.}$$

$$31.5. 1,36 \cdot 10^4 \text{ Дж; } 2,04 \cdot 10^4 \text{ Дж; } 3,40 \cdot 10^4 \text{ Дж.}$$

$$32.1. 0,5 \text{ м.}$$

$$32.2. \Delta U = 8,4 \cdot 10^3 \text{ Дж; } A = 5,6 \cdot 10^3 \text{ Дж.}$$

$$32.3. \Delta U = 10 \text{ кДж; } A = 4 \text{ кДж.}$$

$$32.4. 3,2 \cdot 10^4 \text{ Па.}$$

$$32.5. \frac{V_1}{V_2} = 26.$$

$$32.6. c_{p1} = 1,45 \cdot 10^4 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)} \\ (c_{\text{табл}} = 1,42 \cdot 10^4 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}); \\ c_{p2} = 5,19 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)} \\ (c_{\text{табл}} = 5,2 \cdot 10^4 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}); \\ c_{p3} = 9,1 \cdot 10^2 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)} \\ (c_{\text{табл}} = 9,2 \cdot 10^2 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}).$$

$$32.7. c = 25 \text{ Дж/(К} \cdot \text{моль)}; \\ c_S = 1,14 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}; \\ c_{\text{Fe}} = 4,5 \cdot 10^2 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}; \\ c_{\text{Cu}} = 3,9 \cdot 10^2 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}; \\ c_{\text{Fe}} = 4,6 \cdot 10^2 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}; \\ c_{\text{Cu}} = 3,9 \cdot 10^2 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}; \\ c_{\text{Hg}} = 1,3 \cdot 10^2 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}; \\ c_{\text{Al}} = 9,3 \cdot 10^2 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}; \\ c_{\text{Hg}} = 1,38 \cdot 10^2 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}; \\ c_{\text{Al}} = 9,2 \cdot 10^2 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

32.8. $c = 2,08 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$. Во всех трех случаях не соответствует закону Дюлонга — Пти. В последнем случае результат ближе к соответствию.

$$33.1. T_B = 500 \text{ К; } T_C = 1500 \text{ К.}$$

$$33.2. 330 \text{ К.}$$

$$35.1. 43\%.$$

$$35.2. 52\%.$$

$$35.3. 61\%.$$

$$35.4. \eta_1 = 0,52; \eta_2 = 0,23; \eta_1 > \eta_2.$$

39.1. Уменьшится в 9 раз.

39.2. Уменьшится в 2 раза.

$$39.3. 9 \cdot 10^{-8} \text{ Н.}$$

$$39.4. \frac{F_e}{F_g} = 2,27 \cdot 10^{39}.$$

39.5. $5,2 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$; равновесие неустойчивое.

$$39.6. 10^{-3} \text{ Н.}$$

$$39.7. \eta \approx 1,4 \cdot 10^{-18}.$$

$$40.1. 5,76 \cdot 10^{11} \text{ Н/Кл.}$$

$$40.2. E = 200 \text{ Н/Кл.}$$

- 40.3. $E=3,8 \cdot 10^3$ Н/Кл.
 40.4. $8,1 \cdot 10^3$ Н/Кл.
 40.6. $m=1,6 \cdot 10^{-18}$ кг; $r=7,2 \cdot 10^{-8}$ м.

- 41.1. $\approx 5,2 \cdot 10^5$ Кл.
 41.2. 5,6 Кл/м.

- 42.1. $E_p = -4,6 \cdot 10^{-18}$ Дж;
 $E_k = 2,3 \cdot 10^{-18}$ Дж;
 $E_{\text{полн}} = -2,3 \cdot 10^{-18}$ Дж.

- 42.2. $8 \cdot 10^6$ м/с.
 42.3. 225 Дж.
 42.4. 2,53 Дж.

- 43.1. 30 Дж.
 43.2. 2 В.

- 43.3. $\Delta\varphi = \frac{qd}{S\epsilon_0}$.

- 43.4. 0.

- 43.5. $\varphi = \frac{kq}{R}$.

- 43.6. 5000 В/м.
 43.7. 9 В.

- 43.8. $x = \frac{Ul}{2\varphi d} (2L+l) = 1,04$ см.

- 44.2. $4,4 \cdot 10^{-9}$ Кл; 0 (внутри шара).

- 45.1. $2 \cdot 10^{-6}$ Ф.

- 45.2. 11,3.

- 45.3. 102 В.

- 45.4. Напряжение не изменится, заряд возрастет в ϵ раз.

- 45.5. Заряд не изменится, напряжение упадет в ϵ раз.

- 46.1. $5 \cdot 10^{-4}$ Дж.

- 46.2. $1,25 \cdot 10^{-6}$ Дж; $2,5 \cdot 10^{-5}$ Дж.

- 49.1. 2 Ом.

- 49.2. 5 В; 0,5 А.

- 49.3. 10 Ом.

- 49.4. 9 В; 30 Ом.

- 49.5. 20 В.

- 49.6. 2 мА; 0,2 А.

- 49.7. 5 МОм.

- 49.8. Уменьшилось.

- 49.9. В $\frac{2R+r}{R+r}$ раз.

- 49.10. 300 А.

- 50.3. 45 кОм.

- 50.4. 0,11 Ом.

- 50.5. 13,3 кОм; изменится в 20 раз.

- 50.6. 2,1 В; $4,2 \cdot 10^{-6}$ Кл.

- 50.7. 110 В.

- 51.1. $I_1 = \frac{\mathcal{E}_1}{r_1}$; $I_2 = \frac{\mathcal{E}_2}{r_2}$; $I_{AB} = \frac{\mathcal{E}_1 r_2 - \mathcal{E}_2 r_1}{r_1 r_2}$.

- 51.2. $R = 0,67$ Ом; $I_2 = 0,5$ А; $I = 1,5$ А.

- 51.3. $q = \frac{\mathcal{E} C_1 (R_1 + R_2) + \mathcal{E} R_1 C_2}{R_1 + R_2}$.

- 52.1. $1,12$ мм².

- 52.2. 1 мА; $2 \cdot 10^3$ В.

- 52.3. $P = I^2 R = \frac{\mathcal{E}^2 R}{(R+r)^2}$.

- 52.6. 4 Ом.

- 53.1. 0,3125 Н.

- 53.2. 40 А.

- 53.3. 0,01 Тл.

- 54.1. 1,5 Н.

- 54.2. $8 \cdot 10^{-2}$ Тл.

- 54.3. $1,3 \cdot 10^{-2}$ Тл.

- 55.1. $R = \frac{mv}{eB} = 5,6 \cdot 10^{-2}$ м.

- 55.2. Уменьшится в 3 раза.

- 55.3. $W = \frac{R^2 e^2 B^2}{2m} \approx 9 \cdot 10^{-12}$ Дж.

- 58.1. $m = \frac{2IBlrN}{gR} = 7,2 \cdot 10^3$ кг.

- 58.2. $\eta = 83\%$.

- 59.1. $2 \cdot 10^{-3}$ В.

- 59.2. 55.

- 59.3. 0,22 В.

- 61.1. $5 \cdot 10^{-4}$ Гн.

- 61.2. 1000 В.

- 61.3. 0,02 Гн.

- 62.1. $W = \frac{LI^2}{2} = 1,04$ Дж;

$$5 \text{ кДж/м}^2.$$

- 62.2. 46,5 А.

$$63.1. 60 \text{ В.}$$

$$63.2. 162,5.$$

$$65.1. \begin{cases} 8,7 \cdot 10^{-4} \text{ М,} \\ 1,5 \cdot 10^9 \text{ М.} \end{cases}$$

$$65.2. 6,25 \cdot 10^{-4} \text{ М/с.}$$

$$66.1. 3,6 \text{ Ом.}$$

$$66.2. 10^{-5} \text{ К}^{-1}.$$

$$66.3. 77 \text{ Ом.}$$

$$66.4. \frac{l_1}{l_2} = 2,25 \cdot 10^{-2}.$$

$$67.1. 3,9 \cdot 10^9 \text{ Кл.}$$

$$67.2. 3,9 \cdot 10^4 \text{ Кл.}$$

$$69.1. v = \sqrt{\frac{2eU}{m}} = 5,3 \cdot 10^7 \text{ м/с.}$$

$$69.2. v = l \sqrt{\frac{eU}{2mdx}} = 1,03 \cdot 10^7 \text{ м/с.}$$

ПРЕДМЕТНО-ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Авогадро А.* 88
Ампер А. 284
Ампер (единица силы тока) 285
Амплитуда колебаний 76
Анизотропия 142
Аркадьев В. К. 337
Атомная единица массы 88
- Бойль Р.* 114
Брун Р. 92
- Ван-дер-Ваальс И.* 119
Ватт (единица мощности) 281
Вебер (единица магнитного потока) 288
Величина инвариантная 16
— относительная 16
Вес 41
Вечный двигатель 167
Взаимодействие магнитное 285
— электростатическое 216
Влажность относительная 130
Волны механические 82
— поперечные 82
— продольные 82
— сейсмические 85
Вольт (единица потенциала) 239
Вольт-амперная характеристика
полупроводникового диода 366
Вул Б. М. 260
- Газ идеальный 98
— реальный 119
Галилей Г. 22
Гальванопластика 341
Гальваностегия 341
Гей-Люссак Ж. 88
Гельмгольц Г. 165
Генератор электрический постоянного тока 322
Генри (единица индуктивности) 317
Гигрометр 131
- Гистерезис 298
Гук Р. 143
Гюйгенс Х. 143
- Давление идеального газа 99
Дальтон Д. 88
Двигатель внутреннего сгорания 199
— Дизеля 201
— карбюраторный 199
— постоянного тока 306
— ракетный 204
— реактивный 204
— тепловой 186
— турбореактивный 203
Движение броуновское 91,94
— вращательное 43
— колебательное гармоническое 76
— механическое 3
— неравномерное 7
— поступательное 4
— равномерное 6
— равноускоренное 7
— тепловое 9
Демокрит 87
Деформация 149
— остаточная 151
— пластическая 150
— растяжения 150
— сжатия 150
— упругая 149
Джоуль Д. 165
Джоуль (единица работы) 66
Диаграмма растяжения 150
— состояний вещества 126
— фазовая 125
Диамагнетик 300
Дизель Р. 201
Динамика 22
Диод полупроводниковый 365
Диссоциация электролитическая 339
Диффузия 91

Диэлектрик (изолятор) 247
Длина свободного пробега 120
Домен 260, 301
«Дырка» 360
Дюлонг П. 184

Закон Авогадро 88

- Ампера 286
 - Бойля — Мариотта 97, 114
 - всемирного тяготения 34
 - Гей-Люссака 98, 116
 - Гука 24
 - Дальтона 97
 - движения 4
 - Джоуля — Ленца 282
 - Дюлонга — Пти 184
 - Кеплера второй 61
 - кратных отношений 88
 - Кулона 220
 - Ньютона второй 24
 - — первый 22
 - — третий 25
 - Ома 267
 - сложения скоростей 18
 - сохранения импульса 55
 - — момента импульса 59
 - — полной механической энергии 70
 - — электрического заряда 217
 - — энергии 164
 - термодинамики второй 196
 - — первый 165
 - Фарадея (для электролиза) 339
 - Шарля 97, 115
 - электромагнитной индукции 312
- Заряд удельный 296
- электрический 215
 - — точечный 221
 - электрона 340

Изобара 115

Изотерма 114

- пара 129

Изохора 115

Импульс силы 55

— тела 55

Индуктивность 317

Индукция магнитная 286

- электромагнитная 308

Ионизация термическая 342

- электронным ударом 343

Иоффе А. Ф. 355

Испарение 126

Источник тока 263

Кавендиш Г. 34

Камерлинг-Оннес Г. 335

Карно С. 188

- , цикл 189

Кельвин (единица температуры) 105

Кеплер И. 32

Кинематика 3

Кипение 129

Клапейрон Б. 111

Клаузиус Р. 98

Кобеко П. П. 260

Колебания механические 75

- гармонические 76

Количество вещества 89

- теплоты 163

Конденсатор 252

- плоский 252

Конденсация 126

Концентрация молекул 99

Коэффициент безопасности (запас прочности) 151

- давления температурный 97

- объемного расширения температурный 98

- полезного действия 188

- Пуассона 183

- сопротивления температурный 323

- холодильный 210

Кристалл 142

- жидкий 158

- , симметрия 145

Кристаллизация 153

Кулон Ш. 220

Кулон (единица электрического заряда) 221

Курчатов И. В. 260

Ленц Э. X. 315
Линии магнитной индукции 287
— напряженности электрического поля 226
Ломоносов М. В. 143

Магнит 302
Майер Р. 165
Максвелл Дж. 95
Мандельштам Л. И. 330
Мариотт Э. 97
Масса 22
— молярная 89
— относительная 88
Масс-спектрометр 296
Машина постоянного тока 306
— тепловая 198
Маятник 76
Менделеев Д. И. 111
Метр 4
Микрофон 326
Милликен Р. 355
Модуль упругости (модуль Юнга) 149
Моль 89
Момент импульса 59
— инерции 45
— силы 45
Монокристалл 145
Мощность тока 281

Нагреватель 186
Напряжение механическое 149
— электрическое 241
Напряженность 224
Насос тепловой 210
Нуль абсолютный 105
Ньютон И. 22, 34
Ньютон (единица силы) 23

Ом Г. 264
Ом (единица электрического сопротивления) 264

Папалекси Н. Д. 330
Пар
— насыщенный 128
— ненасыщенный 128

Парамагнетик 299
Параметр макроскопический 99
— микроскопический 99
Пара сил 51
Паскаль (единица давления) 149
Перемещение 4
Период 11, 75
Перрен Ж. 94, 354
Петров В. В. 346
Плазма 294, 343
Плотность заряда поверхностная 231
— энергии магнитного поля 320
— — электрического поля 258
— — электромагнитного поля 320
Поверхностное натяжение 135
Поверхность эквипотенциальная 239
Поле магнитное 285
— — однородное 288
— потенциальное 236
— электрическое 223
— — индукционное 310
— — однородное 226
— электромагнитное 215, 311
— электростатическое 234
Ползунов И. И. 198
Поликристалл 145
Полиморфизм 145
Полупроводник 356
— *n*-типа (электронный) 362
— *p*-типа (дырочный) 363
—, *p* — *n*-переход 363
Поляризация
— диэлектрика 247
— ионная 249
— ориентационная 250
— спонтанная 259
— электронная 249
Порядок ближний 125
— дальний 125
Постоянная Авогадро 89
— Больцмана 107
— газовая молярная 110
— гравитационная 34

- магнитная 290
- электрическая 221
- Потенциал 238
- Поток вектора напряженности 228
 - магнитный 288
- Правила Кирхгофа 278
- Правило буравчика 291
 - левой руки 289
 - Ленца 315
- Предел пропорциональности 150
 - прочности 151
 - текучести 150
 - упругости 150
- Прибор электроизмерительный 302
 - — магнитоэлектрической системы 302
 - — электродинамической системы 304
 - — электромагнитной системы 304
 - — электростатической системы 305
- Принцип относительности 38
 - суперпозиции 84, 222
- Проводимость
 - дырочная 362
 - примесная 361
 - собственная 359
 - электронная 362
- Проводник 244
- Проницаемость диэлектрическая 248
 - магнитная 298
- Процесс адиабатный 173
 - изобарный 45
 - изотермический 114
 - изохорный 115
 - необратимый 193
 - неравновесный 161
 - обратимый 193
 - равновесный 161
 - самопроизвольный 193
 - циклический (круговой) 170
- Психрометр 131
- Пти А.* 184
- Путь 4
- Пьезоэлектрический эффект 261
- Работа выхода 349
 - силы 65
 - тока 281
- Равновесие тепловое 103
- Разность потенциалов 238
- Разряд дуговой (электрическая дуга) 346
 - искровой 344
 - коронный 345
 - несамостоятельный 342
 - самостоятельный 343
 - тлеющий 347
- Резонанс 80
- Решетка кристаллическая пространственная 144
- Рикке Э.* 329
- Румфорд Б.* 90
- Самоиндукция 317
- Сахаров А. Д.* 294
- Сверхпроводимость 335
- Сегнетоэлектрик 260
- Секунда 5
- Сила 23
 - Ампера 285
 - всемирного тяготения 33
 - инерции 40
 - коэрцитивная 299
 - Лоренца 291, 296
 - поверхностного натяжения 135
 - равнодействующая 24
 - сторонняя 263
 - тяги реактивная 57
 - тяжести 33
 - электродвижущая 264
- Система замкнутая 219
 - изолированная 219
 - координат 3
 - отсчета 3
 - — инерциальная 23
 - — неинерциальная 39
 - термодинамическая 162
- Скорость дрейфа 331
 - истечения 57
 - квадратичная 100
 - мгновенная 5
 - наиболее вероятная 95

- секторная 61
- угловая 11
- Славянов Н. Г.* 347
- Сопротивление внутреннее 267
 - удельное 264
 - электрическое 264
- Состояние неравновесное 161
 - равновесное 161
- Статика 50
- Степень свободы 180
- Стерadian 229
- Стюарт Т.* 330
- Сублимация 126
- Тамм И. Е.* 294
- Тело аморфное 147
 - кристаллическое 142
 - отсчета 3
 - рабочее 186
- Температура 103
 - абсолютная 106
 - кипения 129
 - критическая 124
 - Кюри 302
- Теорема Гаусса 229
 - Штейнера 47
- Теплоемкость 1
 - молярная 182
 - удельная 163, 177
- Теплопередача 103
- Термодинамика 160
- Термометр газовый 104
 - жидкостный 103
 - сопротивления 335
- Терморезистор 358
- Тесла Н.* 286
- Тесла (единица магнитной индукции) 286
- Ток индукционный 308
 - электрический 261
- Толмен Р.* 330
- Томсон Дж. Дж.* 354
- Томсон У.* (лорд Кельвин) 105
- Точка Кюри (см. Температура Кюри) 260
 - материальная 4
 - росы 130
 - тройная 126

- Траектория 4
- Триод полупроводниковый (транзистор) 367
- Трубка электронно-лучевая 351
- Турбина газовая 202
 - паровая 201
- Уатт Д.* 198
- Угол телесный 229
- Удлинение абсолютное 144
 - относительное 149
- Уравнение Ван-дер-Ваальса 119
 - волны 83
 - динамики вращательного движения твердого тела 45
 - Клапейрона — Менделеева 111
 - Клаузиуса 100
 - Пуассона 183
 - состояния идеального газа 110
 - теплового баланса 178
- Ускорение касательное 7
 - мгновенное 7
 - нормальное 7
 - свободного падения 8
 - угловое мгновенное 43
 - центростремительное 10
- Условия равновесия 50
- Фаза 123
 - колебаний 76
- Фазовый переход 123
- Фарад 253
- Фарадей М.* 223, 308
- Федоров Е. С.* 145
- Ферромагнетик 297
- Флотация 139
- Формула Циолковского 58
- Фотоионизация 343
- Фоторезистор 358
- Холодильник 187
- Центр тяжести 51
 - масс 52
- Циклотрон 292
- Циолковский К. Э.* 59, 204

Частота 76

Часы 3

Шарль Ж. 104

Штерн О. 96

Эдисон Т. 326, 349

Эйнштейн А. 94

Эквивалент электрохимический 340

Электризация 216

Электрическая емкость 252

Электродвижущая сила 264

— — индукции 308

— — самоиндукции 317

Электродинамика 215

Электролиз 338

Электрометр 217

Электрон 353

Электронвольт 343

Электростатика 219

Эмиссия термоэлектронная 350

— электронная 349

Энергия 63

— внутренняя 162

— ионизации 342

— кинетическая 64

— механическая 64

— поверхностная 133

— — удельная 134

— магнитного поля 319

— потенциальная 68

— средняя кинетическая молекул 101

— электрического поля 257

— электромагнитного поля 319

Эрстед Х. 284

Яблочков П. Н. 347

Якоби Б. С. 341

Ячейка элементарная 144



ОГЛАВЛЕНИЕ

МЕХАНИКА

Глава 1

Основные понятия и законы механики	3
§ 1. Основные понятия и уравнения кинематики	—
§ 2. Инвариантные и относительные величины в кинематике	16
§ 3. Основные понятия и законы динамики	22
§ 4. Прямая и обратная задачи механики	31
§ 5. Принцип относительности	38
§ 6. Вращательное движение тел	43
§ 7. Условия равновесия тел	50
§ 8. Закон сохранения импульса	55
§ 9. Закон сохранения момента импульса	59
§ 10. Закон сохранения энергии в механических процессах	63
§ 11. Механические колебания	75
§ 12. Механические волны	82

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

Глава 2

Основы молекулярно-кинетической теории	87
§ 13. Основные положения молекулярно-кинетической теории	—
§ 14. Эксперименты, лежащие в основе молекулярно-кинетической теории	94
§ 15. Свойства газов	97
§ 16. Температура и способы ее измерения	102
§ 17. Уравнение состояния идеального газа	109
§ 18. Изопроцессы в газах	114
§ 19. Реальные газы	119
§ 20. Агрегатные состояния и фазовые переходы	123
§ 21. Испарение и конденсация	127
§ 22. Свойства поверхности жидкостей	133
§ 23. Капиллярные явления	138
§ 24. Кристаллические тела	142
§ 25. Механические свойства твердых тел	149
§ 26. Получение и применение кристаллов	153
§ 27. Жидкие кристаллы	158

Глава 3

Основы термодинамики	160
§ 28. Термодинамический метод	—
§ 29. Первый закон термодинамики	164

§ 30. Работа при изменении объема газа	168
§ 31. Применение первого закона термодинамики к различным процессам	172
§ 32. Теплоемкость газов и твердых тел	177
§ 33. Принцип действия тепловой машины	186
§ 34. Необратимость тепловых процессов	193
§ 35. Устройство и действие тепловых машин	198
§ 36. Холодильные машины	208
§ 37. Тепловые машины и охрана природы	212

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

Глава 4

Электрическое поле	216
§ 38. Закон сохранения электрического заряда	—
§ 39. Закон Кулона	220
§ 40. Электрическое поле	223
§ 41. Теорема Гаусса	229
§ 42. Работа сил электрического поля	234
§ 43. Потенциал электрического поля	238
§ 44. Проводники и диэлектрики в электрическом поле	244
§ 45. Электрическая емкость	252
§ 46. Энергия электрического поля	257
§ 47. Применение диэлектриков	259

Глава 5

Постоянный электрический ток	261
§ 48. Условия существования постоянного тока	—
§ 49. Закон Ома для полной цепи	267
§ 50. Последовательное и параллельное соединение проводников в электрической цепи	271
§ 51. Правила Кирхгофа	278
§ 52. Работа и мощность тока	281

Глава 6

Магнитное поле	284
§ 53. Магнитное взаимодействие токов	—
§ 54. Магнитное поле тока	289
§ 55. Сила Лоренца	291
§ 56. Магнитное поле в веществе	297
§ 57. Электроизмерительные приборы	302
§ 58. Электрический двигатель постоянного тока	306

Глава 7

Электромагнитная индукция	308
§ 59. Закон электромагнитной индукции	—

§ 60. Правило Ленца	315
§ 61. Самоиндукция	317
§ 62. Энергия электромагнитного поля	319
§ 63. Электрический генератор постоянного тока	322
§ 64. Магнитная запись информации	325

Глава 8

Электрический ток в различных средах	329
§ 65. Электрический ток в металлах	—
§ 66. Зависимость сопротивления металлов от температуры. Сверхпроводимость	333
§ 67. Электрический ток в растворах и расплавах электроли- тов	338
§ 68. Электрический ток в газах	342
§ 69. Электрический ток в вакууме	349
§ 70. Электрон	353
§ 71. Электрический ток в полупроводниках	356
§ 72. Односторонняя проводимость контактного слоя	363
§ 73. Транзистор	367

Глава 9

Методы научного познания и физическая картина мира . . .	370
§ 74. Эксперимент и теория в процессе познания природы	—
§ 75. Моделирование явлений и объектов природы	375
§ 76. Научные гипотезы	378
§ 77. Физические законы	380
§ 78. Границы применимости физических теорий и законов	383
§ 79. Физическая картина мира	385

Глава 10

Лабораторные работы	388
Ответы к задачам для самостоятельного решения	418
Предметно-именной указатель	424

Учебное издание

Серия «Академический школьный учебник»

Кабардин Олег Федорович
Орлов Владимир Алексеевич
Эвенчик Эсфирь Ефимовна и др.

ФИЗИКА

10 класс

**Учебник для общеобразовательных учреждений
и школ с углубленным изучением физики**

ПРОФИЛЬНЫЙ УРОВЕНЬ

ЦЕНТР ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

Руководитель Центра *В. И. Егудин*
Зам. руководителя Центра *Е. К. Липкина*
Редактор *Г. Н. Федина*
Младший редактор *Т. И. Данилова*
Художник *В. С. Давыдов*
Художественный редактор *Т. В. Глушкова*
Технический редактор *Г. В. Субочева*
Корректоры *Л. С. Вайтман, О. В. Крупенко, И. Н. Панкова*

Налоговая льгота — Общероссийский классификатор продукции ОК 005-93—953000. Изд. лиц. Серия ИД № 05824 от 12.09.01. Подписано в печать 24.09.10. Формат 60×90^{1/16}. Бумага офсетная. Гарнитура Школьная. Печать офсетная. Уч.-изд. л. 26,83+0,47 форз. Тираж 10 000 экз. Заказ № 30758.

Открытое акционерное общество «Издательство «Просвещение».
127521, Москва, 3-й проезд Марьиной рощи, 41.

Отпечатано в ОАО «Саратовский полиграфкомбинат».
410004, г. Саратов, ул. Чернышевского, 59. www.sarpk.ru