



ФИЗИКА

Учебник для **10** класса

Под редакцией В. А. Орлова

4-е издание, переработанное и дополненное

*Рекомендовано Министерством образования
Российской Федерации*

Москва
«Просвещение»
2006

УДК 373.167.1:53
ББК 22.3я72
Ф50

А в т о р ы:

А. К. Кикоин, И. К. Кикоин, С. Я. Шамаш, Э. Е. Эвенчик

Физика : Учеб. для 10 кл. / А. К. Кикоин, И. К. Кикоин, Ф50 С. Я. Шамаш, Э. Е. Эвенчик; Под ред. В. А. Орлова. — 4-е изд., перераб. и доп. — М. : Просвещение, 2006. — 335 с. : ил. — ISBN 5-09-012347-0.

УДК 373.167.1:53
ББК 22.3я72

ISBN 5-09-012347-0

© Издательство «Просвещение», 2006
© Художественное оформление.
Издательство «Просвещение», 2006
Все права защищены

Механика

В курсе основной школы вы изучали механические явления. В этом разделе вы познакомитесь с важнейшей физической теорией, которая называется *классическая механика*.

В классической механике вводятся такие фундаментальные понятия, как скорость, ускорение, сила, масса, импульс, работа, мощность, энергия, которые используются во всех последующих физических теориях.

Законы классической механики лежат в основе практически всех важнейших областей современной физики. Эти законы не только объясняют многие механические явления, но и позволяют предсказывать новые явления. В частности позволяют точно предсказать положение и скорость тела в любой момент времени по заданным начальным условиям. Метод решения этой задачи, которая называется основной задачей механики, может рассматриваться как модель любого прогнозирования. При исследовании новых явлений и взаимодействий часто приходится решать и обратную задачу механики: зная, как движется тело, определять действующие на него силы. Именно путем решения обратной задачи механики были установлены многие фундаментальные законы природы, открыты законы сил.

Справедливость законов механики устанавливается не столько их прямой экспериментальной проверкой, сколько согласованием результатов расчетов, выполненных на основе законов механики, с практикой.

При изучении механики легко показать, как с помощью минимального числа физических законов едиными методами решается большое число задач на движение и равновесие тел.

Классическая механика является научной основой одного из важных направлений научно-технического прогресса — механизации производства.

Открытие законов механики великим английским ученым И. Ньютоном явилось одной из наиболее значительных вех в истории науки. Зная законы механики, можно рассчитать движение планет и космических кораблей, законы колебания маятника и движения электронов в кинескопе телевизора и мониторе компьютера.

Механика — наука о движении тел. Разных тел — от тел очень малых размеров до самых больших — от молекул и атомов, размеры которых примерно 10^{-10} м, до таких как планеты (10^7 м), звезды (10^{16} м), галактики (10^{20} м), тел твердых, жидких, газообразных, плазменных.

Явление механического движения состоит в том, что с течением времени изменяется положение тела в пространстве относительно какого-то другого тела, избранного телом отсчета. С ним связывают систему координат — три взаимно перпендикулярные

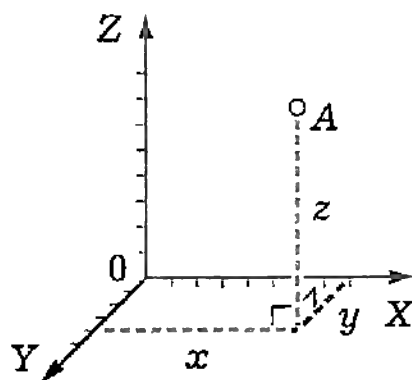


Рис. 1

прямые, исходящие из одной точки — начала координат (рис. 1). Положение точки в пространстве определяется тремя координатами x, y, z . Тело отсчета и связанные с ним система координат и прибор для измерения времени образуют систему отсчета, относительно которой и рассматривается движение тела. Систему отсчета считают при этом неподвижной.

В главе 1 механики — кинематике — мы рассмотрим некоторые виды движений и выясним, как изменяются в зависимости от времени координаты тела и его скорость при этих движениях.

Зная это и начальные условия движения тела, можно определить (вычислить) положение тела в любой момент времени. Именно для этого и существует наука о движении — механика, *ее основная задача*.

§ 1 Поступательное движение тела. Материальная точка

Координаты x, y, z — это координаты некоторой точки. Тело же имеет определенные размеры, и у разных его точек координаты разные. Но мы будем рассматривать только такие движения тела, при которых все его точки движутся одинаково: одинаковы траектории всех точек (траектория — линия, описываемая точкой при ее движении), одинаков путь, пройденный всеми точками за определенное время (путь — это длина траектории). Такое движение тела называется поступательным движением. Так движется, например, железнодорожный поезд (но не колеса его вагонов!), ступеньки эскалатора и т. д. Рассматривая такое движение тела, мы будем иметь в виду движение только какой-то одной его точки.

Не принимать во внимание размеры тела можно и тогда, когда размеры тела много меньше, чем расстояние, которое оно проходит при движении. Так, Земля — тело не малое (диаметр земного шара около 10^7 м), но около Солнца (его диаметр в 110 раз больше) Земля движется по окружности радиусом 150 млн км. Поэтому Землю можно считать точкой, которая обращается вокруг другой точки — Солнца.

Заметим, что, заменяя реальное тело точкой, мы «забываем» только о его размерах. Тела обладают и такими свойствами, которые влияют на их движение. Ими мы, конечно, пренебрегать не будем, так что речь здесь идет не о геометрической, а, как говорят, о материальной точке.

§ 2 Перемещение

Пусть в некоторый начальный момент времени (момент начала отсчета, момент, так сказать, пуска секундомера!) движущееся тело (материальная точка!) находилось в точке M_1 с координатами x_0 и y_0 (рис. 2, а). (Для простоты мы рассматриваем движение на плоскости, когда при движении изменяются только две координаты.)

Каковы координаты x и y точки M_2 , в которой тело окажется в какой-то другой момент времени t ? Чтобы ответить на этот вопрос, нужно знать, в каком направлении от точки M_1 и на какое расстояние от нее переместилось тело за время движения. Для этого проводят направленный отрезок, начало которого находится в точке M_1 , а конец показывает точку M_2 с координатами x и y (рис. 2, б), в которой тело находится в момент времени t . Направленный отрезок прямой, соединяющий начальное положение тела с его последующим положением, называется *перемещением* тела. Это векторная величина. Без таких величин в механике обойтись нельзя. Ведь тело не просто движется. Оно движется куда-то, в каком-то направлении.

Вектор перемещения замечателен тем, что его проекции на координатные оси равны изменениям соответствующих координат. Из рисунка 2, б видно, что проекция s_x вектора $\vec{s}$ на ось X равна $x - x_0$, проекция s_y равна $y - y_0$. Если бы при движении изменялась и координата z , то и ее изменение $z - z_0$ было бы равно проекции вектора $\vec{s}$ на ось z , т. е.

$$s_x = x - x_0; \quad s_y = y - y_0; \quad s_z = z - z_0.$$

Отсюда

$$x = x_0 + s_x; \quad y = y_0 + s_y; \quad z = z_0 + s_z. \quad (1)$$

Эти формулы как будто бы позволяют вычислять координаты. Но для этого нужно знать проекции вектора перемещения, т. е. нужно знать вектор $\vec{s}$. Как найти этот вектор?

§ 3 Прямолинейное равномерное движение. Скорость

Чтобы найти вектор перемещения тела за время t , нужно знать, чему равно перемещение за единицу времени, т. е. величину $\frac{\vec{s}}{t}$. Ее называют

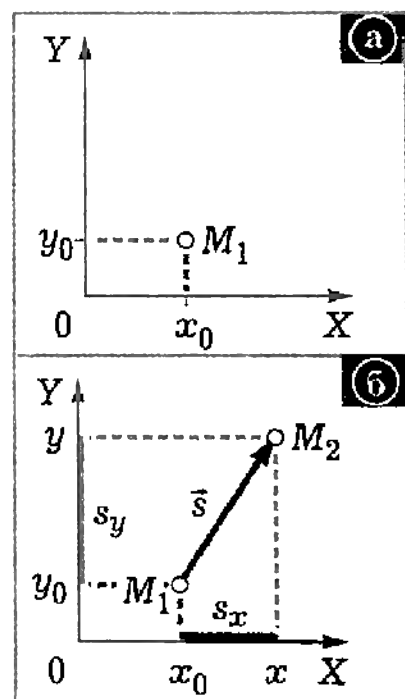


Рис. 2

скоростью и обозначают буквой v . Это тоже векторная величина. Направление вектора скорости $\vec{v}$ — это и есть направление движения тела. Если вектор скорости $\vec{v}$ известен, то известен и вектор перемещения $\vec{s}$: $\vec{s} = \vec{v}t$.

Рассмотрим сначала случай, когда скорость v постоянна. Постоянна по направлению, т. е. движение прямолинейное, и постоянна по модулю, т. е. движение равномерное. В этом, самом простом случае движения координатную ось, например ось X , можно направить вдоль прямой, по которой движется тело. Если равны векторы $\vec{s}$ и $\vec{v}t$, то равны и их проекции на ось X , т. е. $s_x = v_x t$. Используя формулу (1), можно определить координату тела:

$$x = x_0 + v_x t. \quad (2)$$

Если вектор скорости $\vec{v}$ сонаправлен с осью X , то проекция v_x равна модулю скорости $\vec{v}$. Если эти направления противоположны, то проекция $v_x = -v$. По формуле (2) вычисляется координата тела в любой момент времени при прямолинейном равномерном движении. Нужно только знать начальную координату x_0 и скорость тела $\vec{v}$.

§ 4 Прямолинейное неравномерное движение. Ускорение

Рассмотрим теперь более сложное движение, когда скорость остается постоянной по направлению (движение прямолинейное), но изменяется по модулю (движение неравномерное). Поэтому теперь идет речь не о той скорости, которую мы ранее определили как $\frac{\vec{s}}{t}$, т. е. перемещение в единицу времени. Ведь теперь за разные интервалы времени тело совершает разные перемещения. При неравномерном движении скорость изменяется от одной точки к другой, от одного момента времени к другому. Скорость в данной точке и в данный момент времени называется мгновенной скоростью. Как ее найти?

Ускорение. Для вычисления мгновенной скорости нужно знать, на сколько она изменяется в единицу времени. Если в некоторый момент времени скорость тела равна $\vec{v}_0$, а через промежуток времени t она стала равной $\vec{v}$, то за единицу времени она изменилась на величину $\frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}$. Эта величина называется *ускорением*. Поэтому и движение с изменяющейся скоростью называется ускоренным движением. Ускорение тоже векторная величина. Обозначают ее буквой a : $\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}$. Единица ускорения — метр на секунду в квадрате (м/с^2). Для скорости в любой момент времени (мгновенной скорости) мы получаем выражение $\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t$. Так как движение тела прямолинейное и ось X направлена вдоль направления движения, то в проекциях векторов $\vec{v}_0$, $\vec{v}$ и $\vec{a}$ на ось X можно написать:

$$v_x = v_{0x} + a_x t. \quad (3)$$

Ускорение тела тоже может изменяться с течением времени. Мы ограничимся случаем, когда скорость за любые равные промежутки времени

изменяется одинаково, т. е. когда ускорение постоянно. Такое движение называется прямолинейным равноускоренным движением.

Векторы $\vec{v}_0$, $\vec{v}$ и $\vec{a}$ лежат на одной прямой (на оси X), а знаки проекций на ось X определяются тем, как направлены векторы относительно оси. Если векторы $\vec{v}_0$ и $\vec{a}$ сонаправлены, то это значит, что по модулю $v > v_0$ — скорость тела растёт. Если векторы $\vec{v}$ и $\vec{a}$ направлены в противоположные стороны, то $v < v_0$ — скорость тела убывает. Но в обоих случаях движение называется ускоренным.

Напомним (IX класс), что при прямолинейном равноускоренном движении перемещение $\vec{s}$ определяется равенством $\vec{s} = \vec{v}_0 t + \frac{\vec{a} t^2}{2}$, где $\vec{v}_0$ — начальная скорость и $\vec{a}$ — ускорение. Так как движение прямолинейное, то модуль вектора перемещения равен проекции $\vec{s}$ на ось X , а эта проекция равна изменению координаты x , т. е. $s_x = x - x_0$. Отсюда для самой координаты получаем равенство

$$x = x_0 + v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}. \quad (4)$$

По этой формуле вычисляется координата в любой момент времени. Для вычисления координаты надо, следовательно, знать начальную координату, начальную скорость тела и ускорение.

Для вычисления перемещения при прямолинейном равноускоренном движении можно пользоваться и другой формулой, в которую время не входит:

$$s_x = \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{2a_x}. \quad (5)$$

Ее легко получить, если в формулу (4) подставить вместо t ее значение из формулы (3):

$$t = \frac{v_x - v_{0x}}{a_x}.$$

Важный пример прямолинейного равноускоренного движения — свободное падение тел. Еще в XVII в. было установлено, что все тела падают с одинаковым ускорением. Из-за такой особенности его называют ускорением свободного падения и обозначают буквой g . Равно это ускорение $9,81 \text{ м/с}^2$.

§ 5 Криволинейное движение

Движение по криволинейной траектории отличается тем, что при таком движении непрерывно изменяется направление вектора скорости. Уже поэтому криволинейное движение всегда ускоренное. В каждой точке криволинейной траектории вектор скорости направлен по касательной к кривой в этой точке (рис. 3). По модулю скорость тоже может изменяться

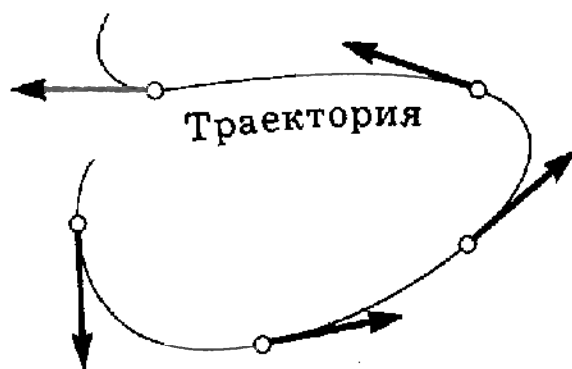


Рис. 3

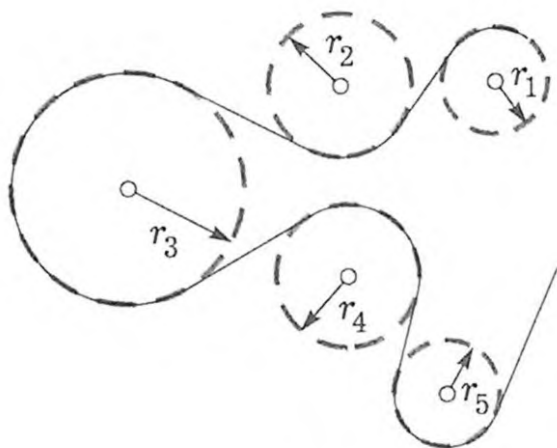


Рис. 4

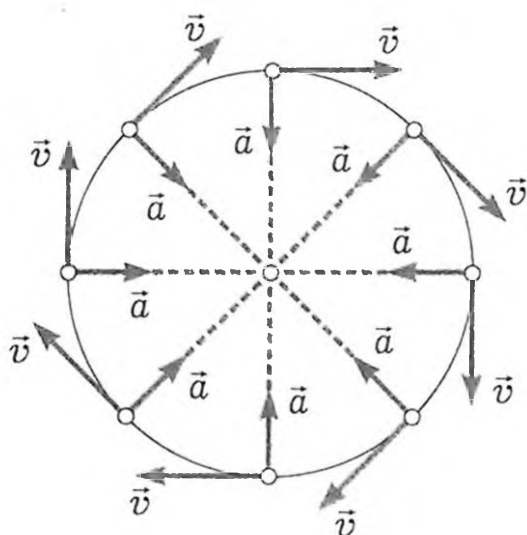


Рис. 5

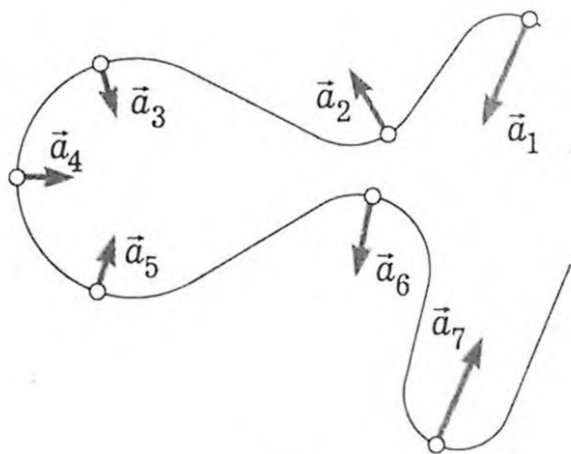


Рис. 6

от точки к точке, но может оставаться и постоянной. В этом последнем случае говорят о равномерном криволинейном движении. Мы ограничимся именно этим случаем.

Ускорение при равномерном криволинейном движении. При таком движении ускорение $\vec{a}$ тела характеризует изменение направления скорости в единицу времени. Вектор ускорения в каждой точке траектории имеет определенное направление и числовое значение. Как направлено и чему равно это ускорение?

Любую криволинейную траекторию, как это видно из рисунка 4, можно приблизительно представить как последовательность дуг окружностей различных радиусов (более точно: каждая точка кривой характеризуется радиусом кривизны). Поэтому вопрос сводится к определению ускорения при равномерном движении тела по окружности.

Напомним (IX класс), что при таком движении вектор ускорения в каждой точке окружности направлен к ее центру и, следовательно, перпендикулярен вектору скорости в той же точке, направленному по касательной. Это показано на рисунке 5. Его называют центростремительным ускорением. По модулю оно выражается равенством

$$a = \frac{v^2}{r},$$

где v — модуль вектора скорости и r — радиус окружности.

На рисунке 6 показана некоторая сложная траектория и векторы центростремительного ускорения в различных ее точках. Хотя при равномерном движении по окружности ускорение по модулю всюду одинаково, это движение равноускоренным назвать нельзя: непрерывно изменяется направление вектора ускорения.

§ 6

Относительные и инвариантные величины в кинематике

Изучая движения тел, прежде всего выбирают систему отсчета. Причем не всегда ее связывают с Землей или с телами, неподвижными относительно Земли. Часто целесообразно систему отсчета связывать с телами, дви-

жущимися равномерно и прямолинейно относительно неподвижных тел. При переходе от одной системы отсчета к другой некоторые величины, характеризующие движение, остаются неизменными (промежутки времени, длины отрезков и др.). Эти величины называются инвариантными. Но есть величины, которые изменяются при переходе из одной системы отсчета в другую (траектория, координаты, перемещение, скорость и др.). Эти величины называются относительными.

Это легко понять, рассматривая, например, движение тел в движущемся равномерно поезде — относительно поезда и относительно железнодорожной станции, мимо которой проходит поезд. Допустим, пассажир движется по коридору поезда из одного конца вагона в другой со скоростью $\vec{v}_1$. Его перемещение $\vec{s}_1$ относительно поезда равно по модулю длине коридора. Но сам поезд за это время Δt совершил относительно станции перемещение $\vec{s}_0$. Поэтому перемещение пассажира $\vec{s}$ относительно неподвижной системы отсчета (станции) равно сумме этих перемещений:

$$\vec{s} = \vec{s}_0 + \vec{s}_1. \quad (1)$$

Скорость пассажира в поезде относительно станции найдем, разделив перемещение на малый промежуток времени Δt . Тогда легко видеть, что скорость пассажира $\vec{v}$ относительно неподвижной системы отсчета определяется формулой

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{v}_1, \quad (2)$$

где $\vec{v}_1$ — скорость относительно подвижной системы отсчета (поезда) и $\vec{v}_0$ — скорость подвижной системы отсчета относительно неподвижной. Формула (2), которая называется классическим законом сложения скоростей, является своеобразным «словарем», позволяющим «переводить» скорости из одной системы отсчета в другую.

А что же ускорение тела: является ли оно тоже величиной относительной, или оно инвариантно?

Нетрудно понять, что в системах отсчета, которые движутся относительно друг друга прямолинейно и равномерно, ускорение одно и то же, т. е. оно инвариантно.

Пусть в одной из таких систем отсчета движется тело, скорость которого изменяется за время Δt от $\vec{v}_1$ до $\vec{v}'_1$, т. е. $\Delta \vec{v} = \vec{v}'_1 - \vec{v}_1$. Каковы будут скорости этого тела в начале и конце промежутка времени Δt во второй системе отсчета, которая движется относительно первой с постоянной скоростью $\vec{v}_0$?

Очевидно (см. формулу 2), эти скорости будут $\vec{v}_1 + \vec{v}_0$ и $\vec{v}'_1 + \vec{v}_0$. Значит, изменения скорости тела в этих системах отсчета за время Δt одинаковы: $\Delta \vec{v} = \vec{v}'_1 + \vec{v}_0 - \vec{v}_1 - \vec{v}_0 = \vec{v}'_1 - \vec{v}_1$, следовательно, ускорение тела в этих системах инвариантно.

■ ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

1. Локомотив, находясь на расстоянии $l = 500$ м от светофора и имея в этот момент скорость 72 км/ч, начал торможение. Определите положение локомотива через 10 с и 25 с, если при торможении он двигался с ускорением $0,1 \text{ м/с}^2$.

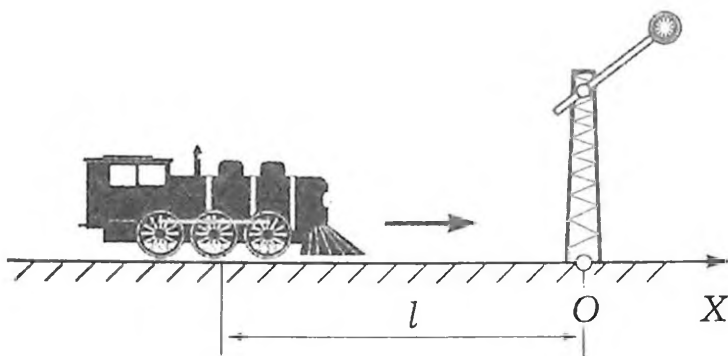


Рис. 7

Решение. Свяжем начало координат со светофором, а за положительное направление оси X примем направление движения локомотива (рис. 7).

Для координаты локомотива запишем формулу

$$x = x_0 + v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2},$$

где $x_0 = -l$, $v_{0x} = v_0$ и $a_x = -a$. Подставив в нее числовые значения величин l , v_0 и a , получим

$$x = -500 + 20t - 0,05t^2.$$

Отсюда $x_1 = -305$ м при $t_1 = 10$ с; $x_2 = -31,3$ м при $t_2 = 25$ с.

2. Из пружинного пистолета, находящегося на высоте 2 м над землей, вылетает вертикально вверх шарик со скоростью 5 м/с. Определите, на какую максимальную высоту над землей он поднимается. Каково перемещение шарика за первые 0,2 с полета? Сопротивление воздуха не учитывать.

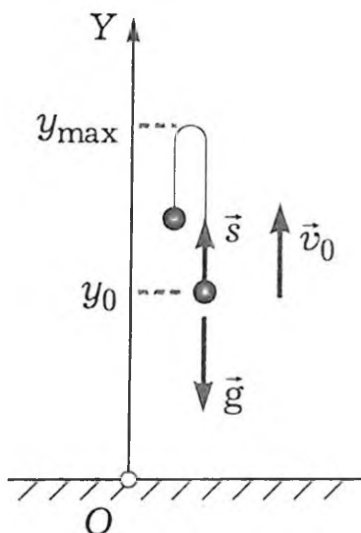


Рис. 8

Решение. Систему отсчета связываем с землей. За начало отсчета перемещения принимаем точку на поверхности земли, а за начало отсчета времени — момент выстрела из пистолета. Положительным направлением координатной оси Y будем считать направление вверх (рис. 8). Тогда $y_0 = 2$ м, $v_0 = 5$ м/с; ускорение свободного падения g направлено в сторону, противоположную положительному направлению координатной оси, поэтому $g_y = -g = -9,8$ м/с².

Максимальную высоту подъема шарика над землей определим из формулы для координаты тела, записав сразу проекции векторов через их модули:

$$y = y_0 + v_0 t - \frac{gt^2}{2},$$

где t — время подъема до высшей точки. Это время определим из формулы скорости равноускоренного движения:

$$v = v_0 - gt.$$

Так как $v = 0$, то для времени подъема получаем

$$t = \frac{v_0}{g}.$$

Учитывая это, приходим к следующей формуле для координаты в конце подъема:

$$y_{\max} = y_0 + \frac{v_0^2}{2g}.$$

Подставив числовые данные, получаем $y_{\max} = 3,25$ м. Длину перемещения за 0,2 с найдем из формулы

$$s_1 = v_0 t_1 - \frac{gt_1^2}{2}.$$

Оно оказывается равным 0,8 м.

■ УПРАЖНЕНИЕ 1

- Самолет при взлете проходит взлетную полосу за 15 с и в момент отрыва от земли имеет скорость 100 м/с. С каким ускорением двигался самолет по взлетной полосе и какова ее длина?
- Снаряд, летящий со скоростью 1000 м/с, пробивает стенку блиндажа за 0,001 с. После этого его скорость оказывается равной 200 м/с. Считая движение снаряда в толще стенки равноускоренным, найдите ее толщину.
- Ракета движется с ускорением 45 м/с^2 и к некоторому моменту времени достигает скорости 900 м/с. Какой путь она пройдет за следующие 2,5 с?
- Постройте в координатных осях (x , t) графики скоростей двух тел, движущихся равноускоренно: первое с возрастающей по модулю скоростью, второе с убывающей. Начальные скорости и ускорения тел соответственно равны 1 м/с и $0,5 \text{ м/с}^2$, 9 м/с и $1,5 \text{ м/с}^2$. Какой путь пройдет второе тело до остановки? Через какое время скорости обоих тел станут одинаковыми и какой путь пройдет за это время первое тело?
- На рисунке 9 изображены графики зависимости проекций скоростей движения трех тел от времени. Каков характер движения этих тел? Что можно сказать о скоростях движения тел в моменты времени, соответствующие точкам А и В графика? Определите ускорения и напишите выражения для скорости и перемещения этих тел.
- Пользуясь приведенными на рисунке 10 графиками зависимости проекций скоростей трех тел от времени: а) определите ускорения этих тел; б) составьте для каждого тела формулу зависимости скорости от времени; в) найдите, чем сходны и чем различаются движения, соответствующие графикам 2 и 3.
- На рисунке 11 приведены графики зависимости проекций скоростей движений трех тел от времени. По этим графикам: а) определите, чему соответствуют отрезки ОА, ОВ и ОС на осях координат; б) найдите ускорения тел; в) напишите выражения для скорости и перемещения каждого тела.
- Пловец, скорость которого относительно воды $v_1 = 5 \text{ км/ч}$, переплывает реку шириной $l = 120 \text{ м}$, двигаясь перпендикулярно течению. Скорость течения $v_2 = 3,24 \text{ км/ч}$. Каковы перемещение s и скорость v пловца относительно берега? Какое время t требуется пловцу, чтобы переплыть реку?
- Пловец (см. задачу 8) намерен переплыть реку по кратчайшему пути (равному ширине реки). Сколько ему потребуется для этого времени?
- Точильный круг радиусом 10 см делает один оборот за 0,2 с. Найдите скорость точек, наиболее удаленных от оси вращения.
- Автомобиль движется по криволинейному участку дороги радиусом 100 м. Чему равно центростремительное ускорение автомобиля, если он движется со скоростью 54 км/ч?
- Период обращения первого космического корабля — спутника Земли «Восток» равнялся 90 мин. Средняя высота спутника над Землей была равна 320 км. Радиус Земли 6400 км. Вычислите скорость корабля.
- Какова скорость движения автомобиля, если его колеса радиусом 30 см делают 600 оборотов в минуту?
- Луна движется вокруг Земли на расстоянии 380 000 км от нее, совершая один оборот за 27,3 сут. Вычислите центростремительное ускорение Луны.

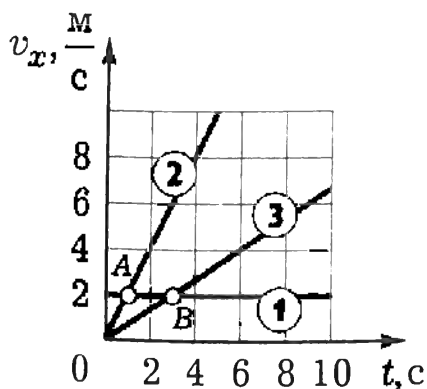


Рис. 9

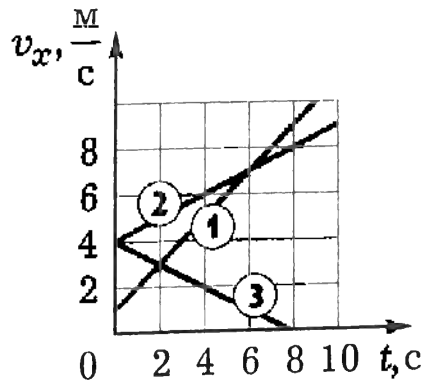


Рис. 10

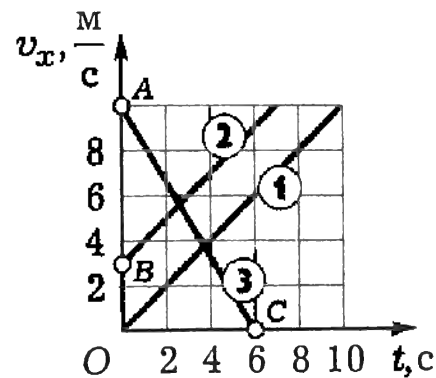


Рис. 11

В главе 1 мы рассмотрели некоторые виды движения тел. Отличаются они друг от друга прежде всего тем, что при одних движениях скорость тела остается постоянной, у него нет ускорения. В большинстве видов движений тело движется с ускорением. С ускорением движется тело по любой криволинейной траектории, даже если по модулю его скорость не меняется: ведь меняется ее направление. На примере прямолинейного равноускоренного движения мы видели, что для вычисления координаты тела нужно знать его ускорение.

Но как найти ускорение тела? Что для этого нужно знать? На эти вопросы дается ответ в разделе механики, который называется динамикой. В этой главе мы также узнаем, почему тела движутся так или иначе, ведь в кинематике говорится только о том, как они движутся. Поэтому полное решение основной задачи механики дается лишь в динамике.

§ 7

Почему изменяется скорость тела? Силы

Повседневные наблюдения и опыт показывают, что причина изменения скорости тела — это всегда действие на него какого-то другого тела или тел. Когда, например, футболист в стремительном беге по футбольному полю сталкивается с другим футболистом, они, как говорят, взаимодействуют, т. е. действуют друг на друга и оба изменяют свою скорость. Такого рода действия одних тел на другие, приводящие к изменению скорости тел, называются силами. Если свободно падающее тело движется с ускорением, то причина этого ускорения — действие Земли на тело, действие силы со стороны Земли. Действие это называется силой тяжести. Если прикрепить какое-нибудь тело к концу сжатой или растянутой пружины, другой конец которой закреплен, тело получит ускорение. «Виновата» в этом сила со стороны пружины. Эта сила называется силой упругости (на столкнувшихся футболистов тоже действуют силы упругости!). Футбольный мяч, катящийся по траве, постепенно уменьшает свою скорость (ускорение его направлено противоположно скорости). Причина этого ускорения — действие на мяч травы, называемое силой трения. В механике приходится иметь дело именно с этими тремя силами: силой тяжести, силой упругости и силой трения.

Сила — векторная величина. Сила — это не только слово, заменяющее выражение «действие одного тела на другое». Сила — это физическая величина, и притом величина векторная. На это указывает простой опыт. На рисунке 12 показано тело, прикрепленное к растянутой пружине, один конец которой закреплен. Относительно системы отсчета, связанной с Землей, тело покоится. Почему? Ведь на тело действует Земля, которой «полагается» сообщить телу ускорение $9,81 \text{ м/с}^2$!

Состояние покоя тела объясняется, очевидно, тем, что на тело действует, кроме силы тяжести $\vec{F}_T$ со стороны Земли, сила упругости $\vec{F}_{\text{упр}}$ со стороны растянутой пружины. А раз тело покоится, то это значит, что эти две силы равны по мо-

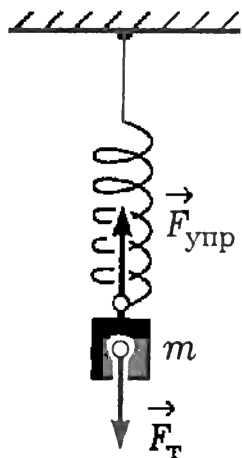


Рис. 12

дулю и направлены в противоположные стороны: сила тяжести направлена вниз, а сила упругости — вверх. Результат их совместного действия такой же, как если бы сил вовсе не было. Это и значит, что сила — векторная величина, ее действие определяется не только модулем, но и направлением.

§ 8

Роль системы отсчета. Первый закон Ньютона.

Инерциальные и неинерциальные системы отсчета

Рассмотрим этот наш опыт более подробно.

Относительно системы отсчета, связанной с Землей, тело покоится, потому что приложенные к нему силы скомпенсированы. Но представим себе, что мимо этого тела прямолинейно и равномерно движется какое-то другое тело. Относительно него, т. е. относительно связанной с ним системы отсчета, тело на пружине будет двигаться тоже равномерно и прямолинейно (без ускорения). Можно выбрать сколько угодно систем отсчета, движущихся прямолинейно и равномерно относительно Земли, и относительно всех таких систем отсчета тело на пружине будет двигаться без ускорения, прямолинейно и равномерно.

Этот пример и другие подобные ему приводят нас к одному из основных законов движения. Его называют *первым законом Ньютона*.

Существуют такие системы отсчета, относительно которых поступательно движущееся тело сохраняет свою скорость постоянной, если на него не действуют силы или если приложенные к нему силы скомпенсированы.

В нашем примере такими системами отсчета были система отсчета, связанная с Землей, и любые системы отсчета, движущиеся относительно Земли прямолинейно и равномерно.

Явление сохранения скорости тела постоянной называется инерцией. Поэтому и системы отсчета, относительно которых тела движутся с постоянной скоростью (в частности, со скоростью, равной нулю), при компенсации приложенных к ним сил называются *инерциальными* системами отсчета, а первый закон Ньютона называют законом инерции.

Математически первый закон Ньютона (закон инерции) может быть выражен так:

$$\text{если } \Sigma \vec{F} = 0, \text{ то } \vec{a} = 0 \text{ и } \vec{v} = \text{const},$$

где буквой F обозначены силы, а знак Σ (греческая буква «сигма») заменяет слово «сумма».

Неинерциальные системы отсчета. Возможны и другие системы отсчета. Представим себе теперь, что мимо тела на пружине движется другое тело, но движется с ускорением относительно Земли, т. е. относительно инерциальной системы отсчета. Относительно системы отсчета, связанной с этим ускоренно движущимся телом, которое мы считаем неподвижным, тело на пружине движется с ускорением, хотя сумма сил, приложенных к нему, по-прежнему равна нулю. Так как ускорение системы отсчета может быть любым, то и ускорение тела на пружине может быть любым без всякой на то причины.

Рассмотрим еще один пример движения тел в неинерциальных системах отсчета. В вагоне поезда, который стоит на станции, на гладком столике лежал шарик. Но как только поезд начал двигаться вправо от станции с

ускорением $\vec{a}$ относительно нее, шарик покатился по столу в противоположную сторону с ускорением $-\vec{a}$, равным по модулю ускорению вагона относительно станции, но направленным в противоположную сторону.

В этом примере мы видим явное нарушение первого закона Ньютона. Ведь шарик стал двигаться с ускорением при отсутствии тела, которое могло бы сообщить ему это ускорение. Такие системы отсчета, в которых тела движутся с ускорением при отсутствии действия на них других тел, называются *неинерциальными*. В неинерциальных системах отсчета движение тел выглядит более сложным. Для расчета движения тел в таких системах отсчета приходится вводить так называемые силы инерции, которые определяются не действием на тело со стороны других тел, а ускорением системы отсчета. В нашем учебнике мы будем для всех расчетов использовать только инерциальные системы отсчета.

§ 9 Ускорение тел при их взаимодействии. Масса

При взаимодействии тел каждому из них силы взаимодействия сообщают ускорения. Каковы они, эти ускорения?

Взаимодействовать тела могут по-разному. Это могут быть разного рода столкновения, удары, тела могут действовать друг на друга через шнур, пружину и т. д. При этом каждое из тел может получать самые различные ускорения. Но опыт показывает, что, как бы данные тела взаимно ни действовали, какие бы они при этом ни получали ускорения, отношение их ускорений будет одним и тем же, а направления ускорений всегда противоположны друг другу. Если, например, столкнулись два одинаковых по размеру шара — алюминиевый и стальной, то ускорение алюминиевого шара окажется втрое больше, чем стального. У другой пары одинаковых шаров, например деревянного и медного, отношение ускорений будет другое: ускорение деревянного шара окажется в 15 раз больше, чем медного. Отношение ускорений взаимодействующих тел зависит не от того, как они взаимодействуют, а от того, каковы сами тела, от какого-то присущего им свойства. Что это за свойство?

Ускорение $\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}$, где $\vec{v} - \vec{v}_0$ — изменение скорости, t — время, в течение которого это изменение произошло. Но стальной шар действовал на алюминиевый столько же времени, сколько алюминиевый на стальной. Однако за это время стальной шар «успел» изменить свою скорость на величину, втрое меньшую, чем алюминиевый. Это значит, что у тел есть некоторое внутреннее свойство, от которого зависит, какое ускорение они получают при взаимодействии. Называют это свойство *инертностью*. Из двух взаимодействующих тел то из них более инертно, скорость которого изменилась меньше. Из-за этого свойства ни у какого тела ни при каком взаимодействии скорость не может измениться мгновенно.

Свойство инертности характеризуется особой величиной — *массой*. Тело более инертное имеет большую массу. В наших примерах масса **стального шара больше массы** алюминиевого, масса медного шара больше массы деревянного. Если обозначить массы взаимодействующих тел через m_1 и m_2 , то можно записать

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{m_2}{m_1}. \quad (1)$$

Отношение модулей ускорений двух взаимодействующих тел равно обратному отношению их масс. Так, из отношения ускорений стального и алюминиевого шаров следует, что масса стального шара втрое больше массы алюминиевого. Формула (1) относится к взаимодействию, например, любого тела с Землей. При этом взаимодействии любое тело получает ускорение, равное $9,81 \text{ м/с}^2$. А Земля? Разумеется, и она тоже получает ускорение. Но согласно формуле (1) оно во столько раз меньше, чем ускорение падающего тела, во сколько раз масса Земли больше массы тела (для наблюдения и сравнения этих двух ускорений нужно было бы выбрать систему отсчета, связанную не с Землей, а, например, с Солнцем!).

§ 10 Сила и ускорение. Второй закон Ньютона

Мы знаем теперь, что причина изменения скорости тел, т. е. ускорения, — это приложенная к телу сила. Какова же связь между причиной (силой) и следствием (ускорением)? Это можно установить с помощью опыта.

Подвергнем действию одной и той же силы разные тела, т. е. тела различных масс, и станем измерять получаемые этими телами ускорения. Тогда окажется, что эта сила сообщает разным телам различные ускорения. Но для всех тел оказывается одинаковым произведение массы тела на его ускорение, т. е. величина ma . Это и позволило Ньютону сформулировать важнейший закон движения — *второй закон Ньютона*:

Сила, действующая на тело, равна произведению массы тела на его ускорение.

Математически этот закон выражается так: $F = ma$, или в векторной форме (поскольку и сила, и ускорение — величины векторные):

$$\vec{F} = m\vec{a}. \quad (1)$$

Как видно из этой формулы, ускорение всегда направлено так же, как и сила.

Подтвердить утверждение, содержащееся во втором законе Ньютона, можно экспериментом по деформации тел, когда при деформации тел, например при сжатии или растяжении пружины, возникает сила упругости. Сила упругости отличается от всех других сил (трения, тяготения) тем, что она зависит *только* от величины деформации пружины и *не зависит* от того, к какому телу приложена.

Прикрепим один конец пружины к телу, масса которого известна, например к тележке массой m (рис. 13). Будем тянуть за второй конец

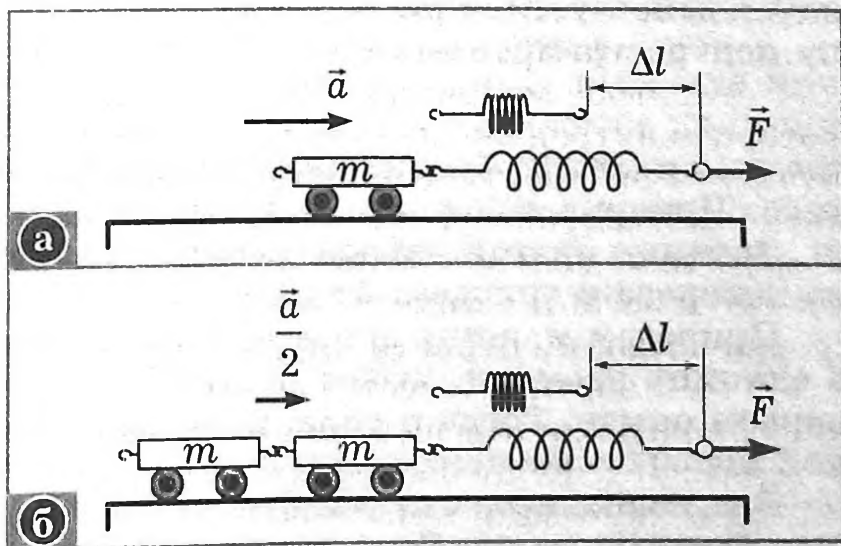


Рис. 13

пружины с постоянной силой $\vec{F}$. Эта сила растянёт пружину на определённую длину Δl . Поэтому сила упругости пружины сообщит тележке ускорение a , которое можно измерить.

Повторяя несколько раз этот опыт, но уже не с одной тележкой, а с «поездом», состоящим из двух, затем трех и т. д. таких тележек, массы которых $2m$, $3m$, $4m$ и т. д., будем растягивать пружину во всех случаях на ту же величину Δl . Значит, сила упругости во всех случаях будет одна и та же. Опыт покажет, что ускорения в этих опытах будут равны: $\frac{a}{2}$, $\frac{a}{3}$, $\frac{a}{4}$ и т. д. Это

значит, что во всех случаях будут равными произведения ma .

Проще произвести такой же опыт, если тела разной массы приводить в движение по окружности и сообщать им центростремительное ускорение.

Поместим тело M (алюминиевый цилиндр с просверленным по его оси отверстием) на стержень центробежной машины (рис. 14, а). Прикрепим к телу конец пружины, а другой ее конец закрепим на раме машины в точке А. Приведем машину во вращение. Тело начнет скользить по стержню, удаляясь от точки А и растягивая пружину. Не будь пружины, тело дошло бы до упора в точке В. Но вследствие действия силы упругости пружины тело, удалившись на небольшое расстояние Δl от оси вращения, станет двигаться по окружности радиусом r (рис. 14, б). Центро-

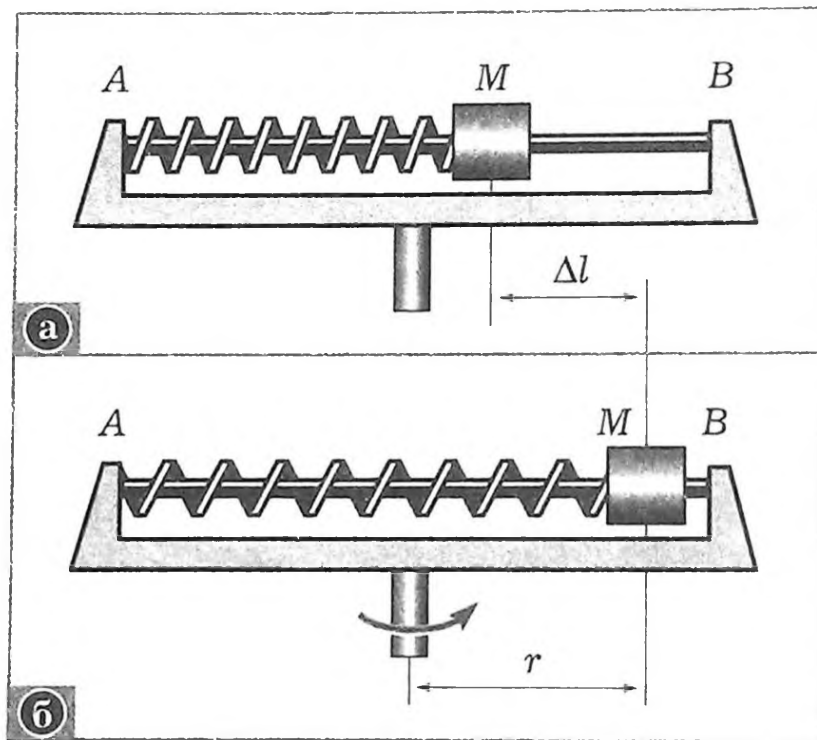


Рис. 14

стремительное ускорение тела направлено по радиусу к центру. Вдоль радиуса действует и сила упругости пружины. Именно эта сила сообщает телу центростремительное ускорение. По модулю это ускорение равно

$$a = 4\pi^2 n^2 r,$$

где n — частота обращения, r — радиус окружности, по которой движется тело. Измерив n и r , мы найдем значение ускорения.

Заменим алюминиевый цилиндр таким же по размерам стальным, масса которого в три раза больше алюминиевого.

Приведем машину снова во вращение и подберем такое число оборотов в единицу времени, чтобы растяжение пружины было таким же, как и в первом опыте. Тогда и сила, действующая на стальной цилиндр, будет такой же.

Опыт покажет, что ускорение стального цилиндра в три раза меньше, чем алюминиевого. Следовательно, для обоих цилиндров одинаковым будет произведение ma при действии на них одинаковой силы F .

В этом опыте, как и в опыте, когда тело получало ускорение при прямолинейном движении, мы получили подтверждение второго закона Ньютона $\vec{F} = m\vec{a}$.

Равнодействующая сил. Если к телу приложено несколько сил, то в формуле (1) под $\vec{F}$ нужно понимать векторную сумму всех приложенных сил:

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

Сумму эту называют равнодействующей или результирующей силой.

В скалярной форме, т. е. для проекций векторов на координатные оси, уравнение (1) распадается на три уравнения:

$$F_x = ma_x, \quad F_y = ma_y, \quad F_z = ma_z.$$

Третий закон Ньютона. В § 9 мы видели, что отношение модулей ускорений взаимодействующих тел равно обратному отношению их масс:

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{m_2}{m_1}, \quad \text{или} \quad m_1 a_1 = m_2 a_2.$$

Там же указывалось, что направления ускорений обоих тел противоположны друг другу. Но согласно второму закону Ньютона $m_1 a_1$ — это модуль силы, приложенной к одному из тел, а $m_2 a_2$ — модуль силы, приложенной к другому, так что в векторной форме последнее равенство принимает вид

$$m_1 \vec{a}_1 = -m_2 \vec{a}_2, \quad (2)$$

или, если обозначить силу $m_1 \vec{a}_1$ через $\vec{F}_1$ и силу $m_2 \vec{a}_2$ через $\vec{F}_2$:

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2. \quad (3)$$

Равенства (2) и (3) выражают *третий закон Ньютона*:

Тела действуют друг на друга с силами, равными по модулю и противоположными по направлению.

Если взаимодействуют не два, а много тел, то третий закон Ньютона относится к взаимодействиям каждого из тел с каждым.

Третий закон Ньютона выражает тот факт, что сила всегда результат взаимодействия тел.

В конце главы 1 был поставлен вопрос о том, как найти ускорение, что для этого нужно знать. Законы движения Ньютона дают на это ответ: чтобы найти ускорение тела, нужно знать силу, приложенную к телу.

Законы Ньютона отвечают и на вопрос, поставленный в начале этой главы: почему тела движутся так или иначе? Так, тело движется прямолинейно и равномерно потому, что сумма приложенных к нему сил равна нулю (первый закон Ньютона); тело движется равноускоренно потому, что на него действует постоянная сила (второй закон Ньютона); тело движется по окружности потому, что к нему приложена сила, перпендикулярная его скорости и равная $\frac{mv^2}{r}$. Ее называют центробежной силой — она сообщает телу центростремительное ускорение.

Второй и третий законы Ньютона так же, как и первый, справедливы лишь тогда, когда движение тела рассматривается относительно инерциальных систем отсчета. В самом деле, относительно неинерциальных систем отсчета тело, как мы видели, движется с ускорением и при отсут-

вии силы, так что второй закон Ньютона, связывающий ускорение с силой, теряет смысл. То же можно сказать и о третьем законе Ньютона. Ведь относительно неинерциальных систем отсчета для ускорения тела действие на него какого-то другого тела не требуется.

глава 3 Силы и взаимодействия в природе

Силы, как мы теперь знаем, всегда возникают в результате каких-либо взаимодействий. Много ли в природе различных взаимодействий и, следовательно, различных сил? Оказывается, нет. По-настоящему различных взаимодействий известно четыре, а взаимодействий, из-за которых возникают силы, влияющие на механическое движение тел, два. Всего же сил, с которыми приходится иметь дело в механике, три. Рассмотрим эти взаимодействия и силы.

§ 11 Гравитационное взаимодействие

Оно состоит в том, что все тела в природе притягиваются друг к другу силами притяжения. Эти силы обычно называются силами всемирного тяготения, хотя их следовало бы называть силами всеобщего тяготения, так как эти силы универсальны. В природе нет ничего, что не было бы подвержено действию этих сил. Другого такого универсального взаимодействия в природе нет.

Исследуя такие явления, как свободное падение тел на Землю, движение планет около Солнца, Луны около Земли, и пользуясь открытыми им законами движения, Ньютон показал, что тела притягиваются друг к другу с силой, пропорциональной массам каждого из тел и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними; направлена эта сила притяжения вдоль прямой, соединяющей тела. Математически закон всемирного тяготения выражается формулой

$$F = G \frac{m_1 m_2}{R^2}, \quad (1)$$

где m_1 и m_2 — массы взаимодействующих тел, R — расстояние между ними и G — коэффициент пропорциональности, называемый гравитационной постоянной. Измерения показали, что она равна $6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$. Из-за малости этой постоянной мы не замечаем сил притяжения окружающих нас тел, но притяжение к Земле мы замечаем, потому что одно из тел — Земля — имеет достаточно большую массу.

Формула (1) применима к материальным точкам. Но ее можно применять и тогда, когда расстояния между взаимодействующими телами велики по сравнению с их размерами, например планеты и Солнце. Однородные шары взаимодействуют между собой так, как будто их массы сосредоточены в их центрах, так что в формуле (1) R — это расстояние между центрами шаров. Материальной точкой можно считать и тело произвольной формы, если его «партнером» по взаимодействию является шар очень большого радиуса. Если тело находится на поверхности Земли или близко от нее, то R в формуле (1) — это радиус Земли R_3 .

Сила тяжести. Одно из проявлений гравитационного взаимодействия, или силы всеобщего тяготения, — сила притяжения тел к Земле, или, как ее принято называть, сила тяжести (слово «гравитация» как раз и значит «тяжесть»). Обозначим массу тела через m , а массу Земли через M_3 . Согласно формуле (1) находим силу, действующую на тело:

$$F = G \frac{mM_3}{R_3^2}. \quad (2)$$

Эта сила сообщает телу ускорение свободного падения g . Согласно второму закону Ньютона мы можем написать

$$mg = G \frac{mM_3}{R_3^2}, \quad \text{или} \quad F_{\tau} = mg,$$

где для g получаем выражение

$$g = G \frac{M_3}{R_3^2}.$$

Из него видно, что ускорение свободного падения от массы тела не зависит, что долго было загадкой. Ведь по второму закону Ньютона ускорение должно быть обратно пропорционально массе тела. Закон всемирного тяготения объяснил эту странность: сила всеобщего тяготения сообщает всем телам одинаковые ускорения потому, что она сама пропорциональна массе того тела, на которое действует.

Таким образом, для силы тяжести можно записать равенство

$$F_{\tau} = mg,$$

где g зависит от расстояния между телом и центром Земли. Если тело находится вблизи поверхности Земли, то R в формуле (2) равно радиусу Земли. Если тело поднять на высоту h от поверхности, то его расстояние от центра равно $R_3 + h$.

Вес. С силой тяжести нельзя путать силу, известную под названием «вес». Вес — это сила, с которой тело вследствие его притяжения к Земле действует на опору (или подвес). Если опора вместе с телом покоится относительно Земли, то вес тела равен силе тяжести. Разница же между ними в том, что сила тяжести приложена к телу, а вес — сила, приложенная к опоре. От силы тяжести тело вблизи Земли ни при каких условиях «избавиться» не может. Но оно может перестать давить на опору. Для этого достаточно, чтобы опора вместе с телом на ней совершала свободное падение: сила тяжести сообщит и телу, и опоре одинаковые ускорения! Вообще всякое тело, на которое действует только сила тяготения, находится в состоянии невесомости. Об этом хорошо знают космонавты — пассажиры космических кораблей (если выключены двигатели!).

§ 12 Электромагнитное взаимодействие

Второй вид взаимодействий, порождающий силы, — это взаимодействие электромагнитное, взаимодействие положительных и отрицательных электрических зарядов. Одноименные заряды отталкиваются друг от друга, разноименные заряды притягиваются. Об этом подробно будет рассказано в разделе «Основы электродинамики» этой книги. Здесь отметим

лишь, что этот вид взаимодействий проявляется в виде уже упоминавшихся сил упругости и трения.

Сила упругости. Эта сила возникает при деформации тела, т. е. при изменении его формы или размеров. Почему можно изменять размеры тела и почему при этом возникает сила?

Все тела состоят из маленьких частиц — атомов или молекул, в которых содержатся еще меньшие частицы — носители положительных и отрицательных электрических зарядов. Поэтому между атомами действуют сложные силы притяжения и отталкивания. В недеформированном теле атомы располагаются на таких расстояниях друг от друга, что ни одна из этих сил не превосходит другую. Эти расстояния можно изменять — увеличивать при растяжении тела или уменьшать при его сжатии. В этом и состоит деформация — в смещении частиц. Но у сил взаимодействия такая особенность: при увеличении расстояний между ними (при растяжении тела) эти силы оказываются силами притяжения, которые как бы стремятся вернуть частицы на прежнее место, а при уменьшении межатомных расстояний силы взаимодействия становятся силами отталкивания, тоже возвращающими атомы к их «нормальным» местам. Это и есть силы упругости.

Опыт показывает, что сила упругости выражается формулой

$$(F_{\text{упр}})_x = -kx,$$

где k — коэффициент пропорциональности (жесткость), x — удлинение тела, положительное при растяжении и отрицательное при сжатии. Знак «—» означает, что сила упругости направлена в сторону, противоположную направлению смещения частиц тела при деформации.

Сила трения скольжения. Эта сила возникает в плоскости касания двух прижатых друг к другу тел при движении одного из них относительно другого. Возникает она, по-видимому, по причине, сходной с силой упругости. Дело в том, что поверхности соприкасающихся тел никогда не бывают идеально гладкими. На них имеется множество бугорков. При движении бугорки деформируются и возникает нечто подобное силе упругости во многих тысячах мест. В процессе движения тел относительно друг друга часть бугорков разрушается, с чем связан износ трущихся поверхностей.

Главная особенность силы трения скольжения состоит в том, что она всегда направлена против направления относительного движения тела и поэтому сообщает телу отрицательное ускорение — уменьшает скорость тела. Модуль силы трения скольжения зависит от силы, перпендикулярной плоскости соприкосновения тел, силы, как бы прижимающей одно тело к другому и называемой силой нормального давления:

$$F = \mu N,$$

где μ — коэффициент трения скольжения, N — модуль силы нормального давления.

■ ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

1. Тонкий стержень длиной 1 м, на конце которого укреплено тело массой 0,5 кг, вращают в вертикальной плоскости с частотой 2 об/с. Какова сила упругости стержня, когда тело проходит самую высокую точку траектории? самую низкую точку траектории?

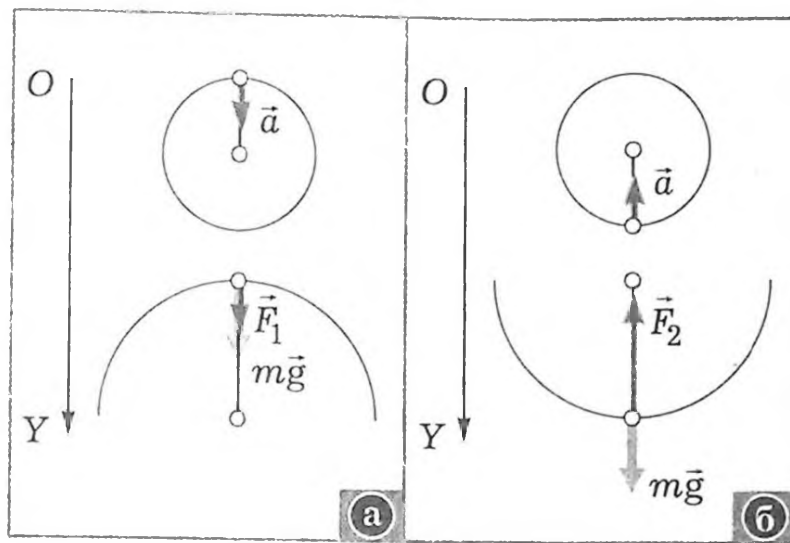


Рис. 15

Решение. На рисунке показана вертикальная координатная ось Y , направленная, например, вниз (рис. 15, а). На тело в верхней точке траектории действуют сила тяжести $\vec{F}_T = m\vec{g}$ и сила упругости $\vec{F}_1$. Обе эти силы направлены вниз¹. В ту же сторону направлено и центростремительное ускорение тела. Запишем уравнение второго закона Ньютона для этого тела:

$$\vec{F}_1 + m\vec{g} = m\vec{a}.$$

Проецируя все векторы на координатную ось и выражая их проекции через модули векторов, получаем $F_{1y} = F$, $g_y = g$ и $a_y = a$.

Поэтому в скалярной форме

$$F_1 + mg = ma, \text{ или } F_1 = ma - mg = m(a - g).$$

Центростремительное ускорение (по модулю) определяется формулой

$$a = \frac{v^2}{R} = 4\pi^2 R n^2.$$

Следовательно,

$$F_1 = m(4\pi^2 n^2 R - g) \approx 73,5 \text{ Н.}$$

В нижней точке траектории (рис. 15, б) сила упругости стержня направлена вверх. Центростремительное ускорение тоже направлено вверх. Поэтому при том же направлении координатной оси уравнение второго закона Ньютона в скалярной форме примет вид

$$mg - F_2 = -ma.$$

Отсюда

$$F_2 = mg + ma = m(g + a), \text{ или } F_2 = m(4\pi^2 R n^2 + g) \approx 83,3 \text{ Н.}$$

¹ В верхней точке траектории тело приобретает скорость, направленную по касательной к окружности. Поэтому оно смещается в этом направлении, и стержень слегка растягивается. Возникающая при этом сила упругости стержня направлена в сторону его сокращения, т. е. вниз, к центру окружности.

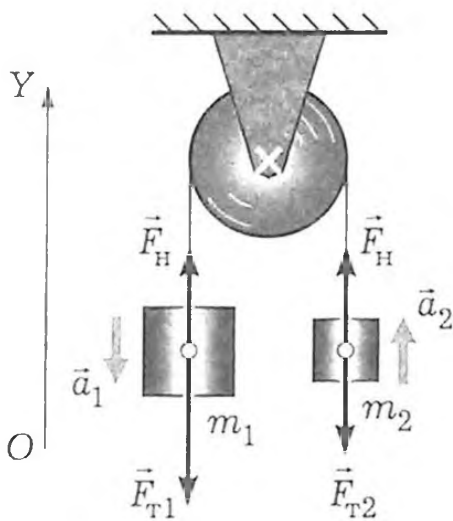


Рис. 16

2. Через неподвижный блок перекинута нить, к концам которой прикреплены грузы массами $m_1 = 5$ кг и $m_2 = 3$ кг. Считая, что нить нерастяжима, а масса нити пренебрежимо мала сравнительно с массой грузов, найдите ускорение, с которым движутся грузы. Чему равна сила натяжения нити?

Решение. На каждый из грузов действуют две силы: силы тяжести $\vec{F}_{T1} = m_1 \vec{g}$ и $\vec{F}_{T2} = m_2 \vec{g}$ и сила натяжения нити $\vec{F}_H$ (рис. 16). Если систему предоставить самой себе, то груз m_1 будет двигаться вниз, а груз m_2 — вверх.

Из нерастяжимости нити следует, что ускорения грузов по модулю одинаковы: $a_1 = a_2 = a$. Если массой нити можно пренебречь, то сила натяжения будет оставаться постоянной по модулю по всей длине нити: $F_{H1} = F_{H2} = F_H$.

Координатную ось Y направим вверх. Запишем уравнение второго закона Ньютона для каждого груза:

$$m_1 \vec{g} + \vec{F}_H = m_1 \vec{a}_1, \quad (1)$$

$$m_2 \vec{g} + \vec{F}_H = m_2 \vec{a}_2. \quad (2)$$

Как видно из рисунка 16, проекции векторов на координатную ось равны: $g_y = -g$, $F_{Hy} = F_H$, $a_{1y} = -a$, $a_{2y} = a$.

Поэтому уравнения (1) и (2) в скалярной форме примут вид:

$$-m_1 g + F_H = -m_1 a, \quad (1')$$

$$-m_2 g + F_H = m_2 a. \quad (2')$$

Вычтем уравнение (1') из уравнения (2'):

$$-m_1 g + m_1 g = m_2 a + m_1 a,$$

или

$$a (m_2 + m_1) = g (m_1 - m_2).$$

Отсюда $a = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} g$. Подставив значения величин, получим

$$a = \frac{5 \text{ кг} - 3 \text{ кг}}{5 \text{ кг} + 3 \text{ кг}} \cdot 9,8 \text{ м/с}^2 \approx 2,5 \text{ м/с}^2.$$

Силу F_H найдем из уравнения второго закона Ньютона для любого груза:

$$F_H = m_1 g - m_1 a; \quad F_H = 5 \text{ кг} (9,8 \text{ м/с}^2 - 2,5 \text{ м/с}^2) \approx 36,5 \text{ Н}.$$

3. На какое расстояние от центра Земли должен быть запущен искусственный спутник Земли, чтобы период его обращения был равен периоду обращения Земли вокруг своей оси, т. е. 24 ч?

Решение. Сила тяготения $\vec{F}_T = m \vec{g}_1$ сообщает спутнику центростремительное ускорение v^2/R_1 , где $\vec{g}_1$ — ускорение свободного падения на расстоянии R_1 от центра Земли ($R_1 = R_3 + h$).

Значит,

$$m g_1 = \frac{m v^2}{R_1} = \frac{m 4\pi^2 R_1}{T^2},$$

или $g_1 = \frac{4\pi^2 R_1}{T^2}$. Для определения g_1 используем соотношение $\frac{g_1}{g} = \frac{R_3^2}{R_1^2}$, откуда $g_1 = \frac{gR_3^2}{R_1^2}$.

Таким образом, получаем расчетную формулу

$$\frac{R_3^2}{R_1^2} = \frac{4\pi^2 R_1}{T^2}, \text{ или } R_1 = \sqrt[3]{\frac{gR_3^2 T^2}{4\pi^2}};$$

$$R_1 \approx 4,2 \cdot 10^7 \text{ м.}$$

В этом случае спутник будет находиться над одной и той же точкой земной поверхности, «висеть» над ней. Такие спутники используются как спутники связи.

■ УПРАЖНЕНИЕ 2

1. Автомобиль массой 1000 кг движется по кольцевой дороге радиусом 100 м с постоянной скоростью 20 м/с. Чему равна сила, действующая на автомобиль? Как она направлена?
2. Два человека тянут веревку в противоположные стороны с силой 50 Н каждый. Разорвется ли веревка, если она выдерживает натяжение до 80 Н?
3. Два мальчика, массы которых 40 и 50 кг, стоят на коньках на льду. Первый мальчик отталкивается от другого с силой 10 Н. Какие ускорения получают мальчики?
4. Вычислите ускорение свободного падения тел вблизи поверхности Марса. Масса Марса равна $6 \cdot 10^{23}$ кг, радиус 3300 км.
5. Тело, брошенное с земли вертикально вверх, упало через 8,0 с. На какую высоту оно поднялось и какова была его начальная скорость?
6. Тело брошено вертикально вверх с начальной скоростью 40 м/с. На какой высоте оно окажется и какую скорость будет иметь через 3 с? 5 с?
7. Бетонную плиту массой 500 кг подъемным краном перемещают: а) равномерно вверх; б) равномерно вниз; в) горизонтально. Чему равны действующая на плиту сила тяжести и вес плиты в каждом из этих случаев?
8. На дне шахтной клетки лежит груз массой 100 кг. Каков будет вес груза, если клеть: а) поднимается вверх с ускорением $0,3 \text{ м/с}^2$; б) опускается вниз с ускорением $0,4 \text{ м/с}^2$; в) движется равномерно; г) свободно падает?
9. На сколько уменьшится вес автомобиля в высшей точке выпуклого моста, если радиус кривизны моста 100 м, масса автомобиля 2000 кг, а скорость его движения 60 км/ч?
10. Найдите вес тела массой 1000 г на полюсе и на экваторе. Радиус Земли считать равным 6400 км.
11. Пуля вылетает в горизонтальном направлении и летит со средней скоростью 800 м/с. На сколько снизится пуля во время полета, если расстояние до цели 600 м?
12. На какой высоте над поверхностью Земли первая космическая скорость равна 6 км/с?
13. С какой скоростью двигались аэросани, если после выключения двигателя они прошли до остановки путь 250 м? $\mu = 0,02$.
14. Шофер выключил двигатель и резко затормозил при скорости автомобиля 72 км/ч. Сколько времени будет двигаться автомобиль до остановки, если $\mu = 0,60$? Какой путь он при этом пройдет?
15. Вычислите ускорение тела, скользящего по наклонной плоскости, если ее высота равна длине основания, а коэффициент трения тела о наклонную плоскость равен 0,20.
16. Шарик, привязанный на нити, описывает окружность в горизонтальной плоскости, совершая один оборот за 0,50 с. С какой силой действует шарик на нить, заставляющую его вращаться? Длина нити 0,50 м. Масса шарика 0,20 кг.

Значение законов Ньютона. Опыт и наблюдения показывают, что причиной изменения движения тел, т. е. причиной изменения их скорости, является воздействие на них других тел. Без такого воздействия движение тела не может измениться, т. е. не может появиться ускорение. Количественным выражением действия одного тела на другое является физическая величина — сила.

Действие одного тела на другое неоднозначно. Тела взаимно действуют друг на друга — взаимодействуют. Ускорение тела при взаимодействии зависит от особого свойства тела — инертности, которая характеризуется физической величиной — массой.

На этих опытных фактах основаны законы, которые правильно описывают движение тел и позволяют решать основную задачу механики, если для описания движения пользуются надлежащим образом выбранными системами отсчета — инерциальными системами отсчета.

Первый закон Ньютона утверждает, что такие системы отсчета существуют, и позволяет находить их.

Второй закон Ньютона устанавливает связь между силой и вызванным ею ускорением.

Третий закон Ньютона показывает, что действие одного тела на другое носит взаимный характер.

Законы Ньютона в принципе позволяют решить любую задачу механики. Если известны силы, приложенные к телу, можно найти ускорение тела в любой точке траектории в любой момент времени.

Так завершается та «цепочка», о которой говорилось в главах 1, 2 и 3: по известным силам и массе тела находят ускорение, затем вычисляют его скорость и перемещение за любой промежуток времени и, наконец, определяют координаты тела в любой момент времени. Для этого должны быть известны начальные условия — начальное положение и начальная скорость тела.

Так, например, ученым, которые руководят полетом космического корабля, необходимо, конечно, заранее знать положение корабля в любой момент времени. Они могут узнать его, пользуясь такой «цепочкой». Им известно начальное положение корабля на стартовой площадке и его начальная скорость. Им известны и силы, которые действуют на корабль в любой точке траектории. Пользуясь этими данными, они и решают задачу механики применительно к космическому полету. Но так как силы, действующие на корабль, все время изменяются, то вычисления настолько сложны, что приходится привлекать на помощь вычислительные машины.

Мы все время говорили, что основная задача механики — определение положения движущегося тела в любой момент времени. Но не следует думать, что законами движения пользуются исключительно для определения именно положения тела. На практике часто требуется вычислить такие величины, как скорость и ускорение тела, силы, действующие на него, и т. д. Законы Ньютона позволяют, разумеется, решать и такие, более простые задачи.

Законы динамики позволяют узнать, какие ускорения получают тела под действием приложенных к ним сил. Но часто важно знать, при каких условиях тела находятся в равновесии, в частности, в состоянии покоя. Эти знания необходимы, например, при постройке зданий, мостов, всевозможных опор и конструкций.

Раздел механики, в котором изучаются условия равновесия твердых тел, называется статикой. При изучении статики мы будем использовать модель абсолютно твердого тела, в котором нет деформаций, т. е. расстояния между точками твердого тела остаются неизменными. Вместе с тем силами реакции, возникающими в нем, пренебрегать не будем. Условия равновесия упруго деформированных тел изучаются в теории упругости.

§ 13 Равновесие тел при отсутствии вращения

Известно, что всякое тело может двигаться поступательно, вращаться или совершать колебания. Из второго закона Ньютона следует, что, для того чтобы тело, которое можно считать материальной точкой, двигалось поступательно, необходимо, чтобы векторная сумма сил, приложенных к телу, была равна нулю. Но реальное тело при выполнении этих условий может вращаться. Например, если на него будет действовать пара сил — система двух сил, равных по модулю и направленных параллельно, но в противоположные стороны (рис. 17), то такое тело будет вращаться. Отметим две важные особенности действия пары сил:



Рис. 17

- 1) под действием пары сил тело всегда будет вращаться вокруг центра масс, так как векторная сумма сил, приложенных к телу, равна нулю;
- 2) пара сил не имеет равнодействующей, так как ее нельзя заменить, а следовательно, уравновесить одной силой.

Для невращающегося тела условие равновесия можно сформулировать следующим образом. Чтобы невращающееся тело находилось в равновесии, необходимо, чтобы векторная сумма приложенных к нему сил была равна нулю. Это условие равносильно условию равенства нулю алгебраической суммы проекций приложенных к телу сил на любые координатные оси.

Состояние равновесия — это не обязательно состояние покоя. Например, парашютист, падающий с постоянной скоростью, находится в состоянии равновесия. Состояние покоя при равновесии возможно, если начальная скорость тела была равна нулю.

§ 14 Равновесие тел с закрепленной осью вращения

Выясним сначала, какие силы не могут вызвать поворот тела с закрепленной осью. Рассмотрим рисунок 18, а, на котором изображена доска, прибитая к стене одним гвоздем. Понятно, что поступательное движение

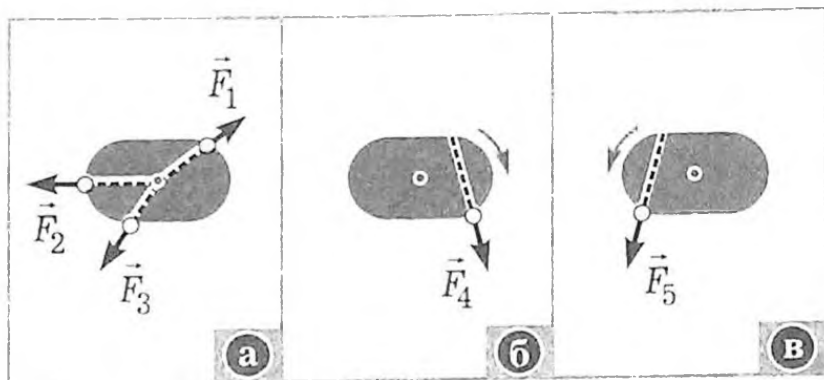


Рис. 18

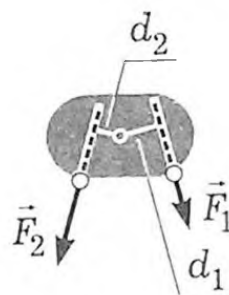


Рис. 19

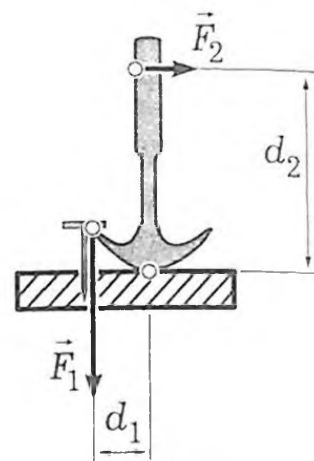


Рис. 20

тела при этом исключено. Но и повороты этой доски под действием сил $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$, $\vec{F}_3$, линии действия которых проходят через ось вращения доски, также не могут происходить. Поворот по часовой стрелке может происходить под действием силы $\vec{F}_4$, а поворот против часовой стрелки — под действием силы $\vec{F}_5$ (рис. 18, б, в). Вращающим действием обладают только силы, линия действия которых не проходит через закрепленную ось. Однако вращающее действие таких сил может быть неодинаковым. Опыт показывает, что оно зависит от модуля силы и кратчайшего расстояния от оси вращения до линии действия силы. Это расстояние называется плечом силы (рис. 19).

Вращающее действие силы определяется произведением модуля силы на ее плечо. Эта величина называется моментом силы относительно оси вращения. Моментам сил, вращающим тело против часовой стрелки, принято приписывать положительный знак, а по часовой стрелке — отрицательный. Опыт показывает, что тело, способное вращаться вокруг закрепленной оси, находится в равновесии, если алгебраическая сумма моментов приложенных к нему сил относительно этой оси равна нулю. Это условие равновесия тел, имеющих ось вращения, получило название правила моментов.

Нетрудно понять, что из правила моментов следует правило рычага, известное вам из курса физики основной школы: рычаг находится в равновесии, если приложенные к нему силы обратно пропорциональны плечам. Ведь из формулы $F_1 d_1 = F_2 d_2$ следует формула $F_1 / F_2 = d_2 / d_1$. На рисунке 20 в качестве примера показан гвоздодер, с помощью которого можно получить выигрыш в силе, равный отношению плеч.

Обобщая сказанное выше, сформулируем общее *условие равновесия тел*:

для того чтобы тело находилось в равновесии, необходимо, чтобы были равны нулю геометрическая сумма сил, приложенных к телу, и алгебраическая сумма моментов сил относительно оси вращения.

Законы движения, и прежде всего второй закон Ньютона, позволяют найти ускорение тела, если известны приложенные к телу силы. А зная ускорение, можно вычислить скорость тела, его перемещение и, наконец, координаты. Но нередки случаи, когда трудно или даже невозможно определить силы. Это особенно относится к таким видам взаимодействий, при которых время действия сил очень мало (толчок, удар, столкновение). В таких случаях для решения основной задачи механики пользуются законами сохранения некоторых величин, позволяющими определять скорости, не зная ни сил, ни ускорений.

§ 15

Импульс тела и импульс силы

Второй закон Ньютона $\vec{F} = m \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}$ показывает, что под действием силы изменяется скорость тела, и это изменение $\vec{v} - \vec{v}_0$ определяется равенством

$$\vec{v} - \vec{v}_0 = \frac{\vec{F}t}{m}. \quad (1)$$

Оно, это изменение, зависит от массы тела, так что при одной и той же силе $\vec{F}$ и одном и том же времени ее действия t у разных тел изменение скорости различное. Но изменим слегка «внешний» вид формулы второго закона, умножив обе части равенства (1) на m :

$$m\vec{v} - m\vec{v}_0 = \vec{F}t. \quad (2)$$

Теперь в левой части равенства стоит не изменение скорости тела, а изменение произведения массы тела на его скорость. И эта величина (в отличие от изменения скорости) от массы не зависит (в правую часть равенства (2) масса не входит!): одна и та же сила, действующая одно и то же время, вызовет у любого тела одно и то же изменение величины $m\vec{v}$. Величина $m\vec{v}$ называется импульсом тела (импульс — латинское слово, означающее «толчок», «удар»). Величина $\vec{F}t$ называется импульсом силы. Из второго закона Ньютона следует, что под действием силы изменяется импульс тела и равно это изменение импульсу силы. Импульс тела, так же как и импульс силы, — векторная величина. Вектор импульса тела направлен так же, как вектор его скорости, вектор импульса силы — как вектор силы.

§ 16

Закон сохранения импульса

До сих пор мы рассматривали действие силы на отдельное тело, не интересуясь тем, откуда сила исходит. Но ведь сила возникает в результате какого-то взаимодействия этого тела с другим телом или телами. Рассмотрим взаимодействие в целом. При этом оказывается: импульс тела относится к немногим физическим величинам, которые обладают свойством сохранения, свойством оставаться неизменными. Относится оно к случаю, когда два или более тел взаимодействуют между собой, но не подвергаются действию

тел, не входящих в эту, как ее называют, замкнутую систему тел. При таком внутреннем взаимодействии на каждое из тел системы действуют силы со стороны других тел, изменяются скорости каждого из тел, но не изменяется суммарный импульс всех тел, **входящих в замкнутую систему**.

Пусть, например, навстречу друг другу движутся два тела с массами m_1 и m_2 и скоростями $\vec{v}_1$ и $\vec{v}_2$. Их общий импульс равен $m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2$. Тела столкнулись, и при этом взаимодействии на первое тело действует сила $\vec{F}_1$, на второе тело — сила $\vec{F}_2$. Напишем для каждого из тел уравнение (2) из § 15:

$$m_1\vec{v}'_1 - m_1\vec{v}_1 = \vec{F}_1 t; \quad m_2\vec{v}'_2 - m_2\vec{v}_2 = \vec{F}_2 t,$$

где $\vec{v}'_1$ и $\vec{v}'_2$ — скорости тел после столкновения. Сложим почленно оба равенства, имея в виду, что по третьему закону Ньютона $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ равны по модулю, но противоположны по направлению, а время t одинаково для обоих тел. Тогда

$$m_1\vec{v}'_1 - m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}'_2 - m_2\vec{v}_2 = 0,$$

или

$$m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = m_1\vec{v}'_1 + m_2\vec{v}'_2.$$

Слева в этом равенстве стоит сумма импульсов обоих тел до столкновения, а справа — сумма импульсов тех же тел после столкновения. Импульс каждого из тел при взаимодействии изменился, но сумма осталась неизменной. В этом и состоит закон сохранения импульса. Внутренние силы, т. е. силы взаимодействия между телами, не могут изменить импульс замкнутой системы тел. Известная поговорка «Нельзя самого себя поднять за волосы» — это своеобразная формулировка закона сохранения импульса. Ее безвестный автор, сам того не подозревая, «открыл» важный закон природы. Закон сохранения импульса лежит в основе реактивного движения ракет. Именно благодаря закону сохранения импульса можно во многих случаях определять скорости тел, не зная сил и ускорений.

■ ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

1. Железнодорожный вагон массой 30 т, движущийся со скоростью 1,5 м/с, сцепляется с неподвижным вагоном, масса которого 20 т. Какова скорость вагонов после сцепки? Считать участок пути прямолинейным.

Решение. В условии задачи ничего не говорится о действующей силе: она неизвестна. Поэтому решать задачу следует с помощью закона сохранения импульса.

Направим координатную ось вдоль вектора скорости первого вагона. Согласно закону сохранения импульса геометрическая сумма импульсов обоих вагонов постоянна. Значит, остается постоянной и алгебраическая сумма проекций импульсов на координатную ось. Обозначим массу первого (движущегося) вагона через m_1 , второго — через m_2 . Скорость первого вагона до сцепки обозначим через $\vec{v}_1$, общую скорость обоих вагонов после столкновения — через $\vec{v}$. До сцепки общий импульс системы был равен $m_1\vec{v}_1$. Его проекция равна m_1v_{1x} , или m_1v_1 (так как $v_{1x} = v_1$). После сцепки оба вагона движутся как одно тело массой $m_1 + m_2$, а проекция общего импульса равна $(m_1 + m_2)v$, так что можно написать

$$m_1 v_1 = (m_1 + m_2) v_x.$$

Отсюда

$$v_x = \frac{m_1 v_1}{m_1 + m_2}, \quad v_x = \frac{3 \cdot 10^4 \text{ кг} \cdot 1,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{5 \cdot 10^4 \text{ кг}} = 0,9 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Условия приближенного выполнения закона сохранения импульса. Изменение импульса системы тел зависит от внешней силы и от времени ее действия. При приближенном решении ряда практических задач можно применять закон сохранения импульса и в незамкнутых системах, если выполняются следующие условия: время действия внешней силы достаточно мало: $\Delta t \rightarrow 0$; модуль внешней силы должен быть много меньше модулей внутренних сил, действующих в системах: $F \ll F_{\text{вн}}$.

Для незамкнутой системы тел полный импульс не сохраняется ($\Delta p_c \neq 0$), но некоторые проекции этого импульса на координатные оси, в направлении которых сумма внешних сил равна нулю, могут оставаться постоянными.

Приведем пример решения задачи, иллюстрирующий сказанное.

2. Ракета общей массой $M = 500 \text{ кг}$ взлетает вертикально вверх. При достижении скорости $v = 100 \text{ м/с}$ от нее отделяется головная часть, имеющая массу $m_1 = 200 \text{ кг}$. Скорость головной части относительно Земли после отделения от ракеты равна $v_1 = 115 \text{ м/с}$. Какова конечная скорость v_2 оставшейся части ракеты.

Решение. Движение ракеты, направленное вдоль оси OY , рассматривается относительно Земли (рис. 21). На ракету действует сила тяжести, сила тяги, направленная вверх, и сила сопротивления воздуха. Такая система не будет замкнутой. Однако отделение головной части ракеты происходит за очень короткое время Δt , в течение которого эти силы мало изменяют скорость ракеты. Поэтому можно с известным приближением применить закон сохранения импульса.

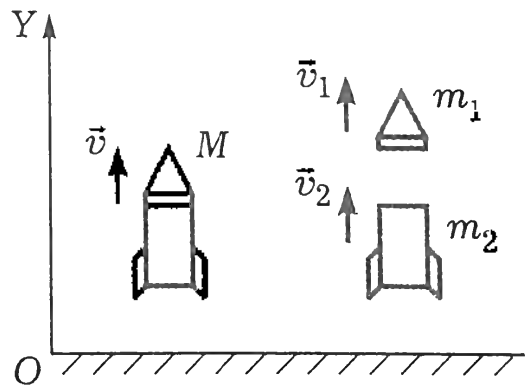


Рис. 21

Так как скорости направлены вдоль оси OY , закон сохранения импульса может быть записан в следующем виде:

$$M v_y = m_1 v_{1y} + m_2 v_{2y}.$$

$$\text{Отсюда } v_{2y} = \frac{M v_y - m_1 v_{1y}}{m_2} = \frac{M v_y - m_1 v_{1y}}{M - m_1},$$

$$v_{2y} = \frac{500 \text{ кг} \cdot 100 \text{ м/с} - 200 \text{ кг} \cdot 115 \text{ м/с}}{300 \text{ кг}} = 90 \text{ м/с}.$$

Так как проекция скорости v_{2y} оставшейся части ракеты положительна, то вектор скорости v_2 направлен вертикально вверх.

Импульс силы Ft связывает результат действия силы с временем ее действия. Но под действием силы тело проходит и определенное расстояние. Связан ли результат действия силы с этим расстоянием?

Пусть тело массой m движется прямолинейно и равноускоренно под действием постоянной силы $\vec{F}$. Тогда второй закон Ньютона может быть записан в скалярной форме, так как проекции векторов $\vec{F}$ и $\vec{a}$ равны их модулям:

$$F = ma. \quad (1)$$

Проекция перемещения тоже равна модулю вектора перемещения $\vec{s}$. Умножим теперь обе части последнего равенства на s , т. е. на расстояние, пройденное телом:

$$Fs = mas.$$

В главе 1 указывалось, что при прямолинейном равноускоренном движении перемещение может вычисляться по формуле (5):

$$s = \frac{v^2 - v_0^2}{2a}, \quad (2)$$

откуда $as = \frac{v^2 - v_0^2}{2}$. Подставив это выражение для as в формулу закона Ньютона, получаем

$$Fs = \frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2}. \quad (3)$$

Величина Fs — произведение силы на расстояние, пройденное телом по линии действия силы, называется работой силы¹. Величина $\frac{mv^2}{2}$ — произведение половины массы тела на квадрат скорости называется кинетической энергией тела. Таким образом, формула (3) — прямое следствие второго закона Ньютона — означает, что действие силы на тело приводит к изменению его кинетической энергии. А равно это изменению работе силы. От массы тела оно не зависит (в левую часть формулы (3) масса не входит).

И работа, и кинетическая энергия — величины скалярные. Но работа может быть положительной и отрицательной. Если векторы силы и перемещения сонаправлены (угол между ними равен 0°) — работа положительна, если сила направлена против перемещения (угол между ними 180°) — работа отрицательна. Положительная работа силы приводит к увеличению кинетической энергии, отрицательная — к ее уменьшению. Если векторы силы и перемещения образуют угол α , отличный от 0° и 180° , то работа силы равна произведению модулей обоих векторов на косинус угла между ними. Работу силы принято обозначать буквой A , так что $A = Fs \cos \alpha$. Отсюда следует, что работа силы, перпендикулярной перемещению, равна нулю. Так, равна нулю работа всякой центростремительной силы.

Сохраняется ли кинетическая энергия? Формула (3) для работы и кинетической энергии напоминает формулу (2) из § 15 для импульса силы и импульса тела. Импульсу силы в (2) соответствует работа силы в (3), импульсу тела в (2) — кинетическая энергия в (3). Но мы видели, что полный импульс тел, образующих замкнутую систему, сохраняется. Можно ли то же

¹ В общем случае работой силы называется произведение модуля силы на модуль перемещения и на косинус угла между ними: $A = Fs \cos \alpha$.

самое сказать о кинетической энергии? Оказывается, нет. Представим себе, что навстречу друг другу движутся с одинаковой скоростью v два шара с одинаковой массой m , сделанные из пластилина (рис. 22). До столкновения их общая кинетическая энергия была равна $2 \frac{mv^2}{2}$. Но, столк-

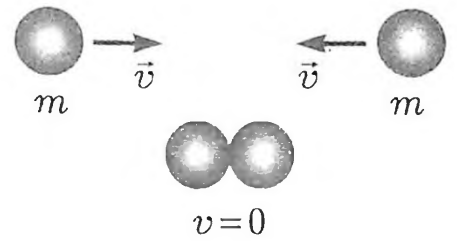


Рис. 22

нувшись, они слипнутся и остановятся, и их общая кинетическая энергия станет равной нулю. Кинетическая энергия исчезла! Импульс же остался равным нулю, как и до столкновения. Если бы шары были не из пластилина, а из стали или кости, то они после столкновения двинулись бы в противоположные стороны с такими же, как до столкновения, скоростями, и их общая кинетическая энергия снова была бы равна $2 \frac{mv^2}{2}$. Но и в этом случае в момент столкновения они на какое-то время (на миг!) остановятся и, значит, их кинетическая энергия исчезнет. О кинетической энергии, следовательно, нельзя сказать, что ей свойственно сохраняться.

§ 18 Еще один вид энергии. Потенциальная энергия

Вспомним, что силы всегда возникают при взаимодействии тел. А при этом, оказывается, изменяются не только импульс и кинетическая энергия. Рассмотрим, например, свободное падение тела массой m с высоты h_1 над некоторым уровнем, с которого ведется отсчет высоты (рис. 23). Тело взаимодействует с Землей, и на него действует сила тяжести $F = mg$, направленная вниз. Вниз направлен и вектор перемещения s , модуль которого $s = h_1 - h_2$, так что косинус угла между $\vec{F}$ и $\vec{s}$ равен единице и работа силы тяжести равна

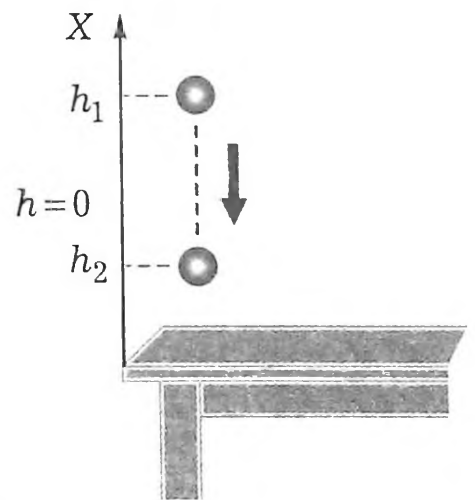


Рис. 23

$$A = mg(h_1 - h_2) = -(mgh_2 - mgh_1). \quad (1)$$

Правая часть этого равенства представляет собой изменение величины mgh , но со знаком «-», который означает, что при падении тела величина mgh уменьшается.

Ранее мы величину $\frac{mv^2}{2}$, изменение которой равно работе силы, называли кинетической энергией. Теперь мы встретились еще с одной величиной, изменение которой тоже равно работе силы. Поэтому и она «заслуживает» названия энергии. Ее и называют энергией, но не кинетической, а потенциальной. Для работы другой механической силы — силы упругости — вычисление дает:

$$A = -\left(\frac{kx_2^2}{2} - \frac{kx_1^2}{2}\right). \quad (2)$$

И здесь работа равна изменению величины $\frac{kx^2}{2}$ с обратным знаком. Ясно, что эта величина представляет собой потенциальную энергию деформированной пружины.

Потенциальная энергия отличается от кинетической, во-первых, тем, что кинетическая энергия зависит от скорости тела, а потенциальная — от координат. Ведь h_1 и h_2 — это координаты тела, отсчитанные от выбранного нулевого уровня, а x_1 и x_2 — координаты конца пружины, если за начало отсчета принять положение конца недеформированной пружины. Другое отличие состоит в том, что при положительной работе силы кинетическая энергия растет, а потенциальная уменьшается, при отрицательной работе наоборот (на это указывает знак «−» в формулах (1) и (2)).

§ 19 Закон сохранения полной механической энергии

Итак, мы установили, что когда тела взаимодействуют друг с другом силами всемирного тяготения или силами упругости, то работа равна изменению потенциальной энергии, взятому с противоположным знаком. Если обозначить потенциальную энергию через W_p , то можно записать

$$A = -(W_{p2} - W_{p1}).$$

С другой стороны, как мы видели раньше, та же работа равна изменению кинетической энергии, которую мы обозначим через W_k :

$$A = W_{k2} - W_{k1}.$$

Так как левые части этих равенств равны друг другу, то равны и правые части

$$W_{k2} - W_{k1} = -(W_{p2} - W_{p1}). \quad (1)$$

Отсюда видно, что в результате взаимодействия и движения тел кинетическая и потенциальная энергии изменяются так, что увеличение одной из них равно уменьшению другой. Происходит как бы превращение одного вида энергии в другой. Но ни одна из них не сохраняется. Зато сохраняется сумма обеих энергий, как это видно из формулы (1), если ее переписать так:

$$W_{k1} + W_{p1} = W_{k2} + W_{p2}. \quad (2)$$

В левой части равенства стоит сумма кинетической и потенциальной энергий системы тел в начальном, а в правой части — в конечном положении. Сумма эта называется полной механической энергией системы. Равенство (2) выражает закон сохранения полной механической энергии замкнутой системы:

Полная механическая энергия замкнутой системы тел, взаимодействующих силами всеобщего тяготения или силами упругости, остается постоянной при любых движениях тел этой системы.

§ 20 О работе силы трения

Говоря о законе сохранения энергии, мы подчеркивали, что он соблюдается, когда действуют силы тяготения или силы упругости¹. Но есть и третья механическая сила, о которой в связи с законом сохранения энергии мы даже не упоминали. Это сила трения. Почему же мы о ней не упо-

¹ Такие силы называют консервативными.

Сила трения скольжения всегда направлена против движения, и ее работа всегда отрицательна. А отрицательная работа приводит к уменьшению скорости тела и, следовательно, к уменьшению кинетической энергии. Отрицательную работу могут совершать и сила тяжести, и сила упругости, если эти силы направлены против движения. Так, если тело брошено по вертикали вверх, сила тяжести совершает отрицательную работу и кинетическая энергия уменьшается. Но при этом возрастает потенциальная энергия и полная энергия сохраняется. В случае же действия силы трения скольжения исчезающая кинетическая энергия не преобразуется в потенциальную энергию¹. Полная механическая энергия уменьшается.

Но энергия все-таки сохраняется. Оказывается, однако, что нарушение закона сохранения энергии вследствие действия силы трения только кажущееся. Дело в том, что движущиеся трущиеся тела нагреваются. А температура тел определяется кинетической энергией частиц, из которых состоят все тела и которые совершают вечные беспорядочные движения. Об этих частицах, об их беспорядочных движениях и о связи их с температурой подробно рассказывается во втором разделе этой книги. Здесь мы отметим лишь, что механическое движение тел — это движение упорядоченное. В том смысле упорядоченное, что все частицы тела движутся в одном направлении. А при движении трущихся друг о друга тел энергия этого упорядоченного движения передается беспорядочно движущимся частицам. Но беспорядочное движение частиц механическим движением не считается. Энергия этих движений — энергия не механическая, а внутренняя. Таким образом, механическая энергия при действии сил трения действительно уменьшается. Но можно также сказать, что она превращается в энергию внутреннюю.

■ ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

1. Пуля массой m попадает в ящик с песком массой M , подвешенный на тросе. Максимальное отклонение ящика от положения равновесия после падения пули таково, что его центр тяжести поднимается на высоту h от первоначального уровня (рис. 24). Определите скорость пули.

Решение. При решении задачи нельзя применять закон сохранения энергии для системы тел «пуля до удара — ящик» в виде

$$\frac{mv^2}{2} = (m + M) gh,$$

так как в этой системе действуют внутренние неконсервативные силы, возникающие при неупругом взаимодействии пули и ящика с песком. При этом часть механической энергии перейдет во внутреннюю энергию $E_{\text{внутр}}$:

$$E_{\text{внутр}} = \frac{mv^2}{2} - (m + M) gh.$$

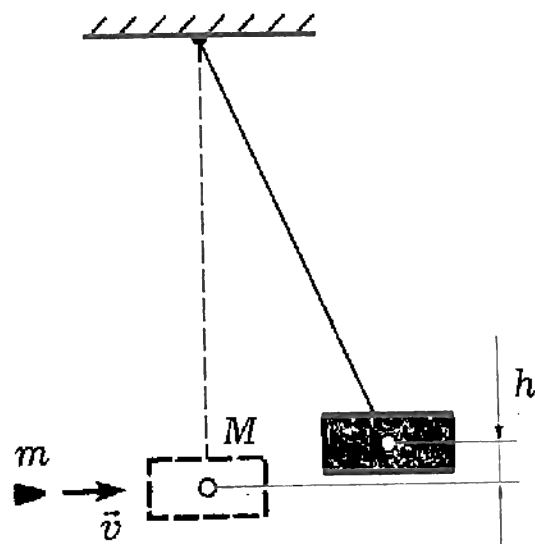


Рис. 24

¹ Такие силы называют неконсервативными.

Следовательно, для определения скорости пули сначала надо применить закон сохранения импульса для замкнутой системы тел «пуля до удара — ящик»:

$$mv = (M + m)u \quad (1)$$

(u — скорость ящика с пулей после удара), а затем закон сохранения механической энергии для замкнутой и консервативной системы тел «пуля после удара — ящик»:

$$\frac{(m + M)u^2}{2} = (m + M)gh. \quad (2)$$

Решая систему уравнений (1) и (2), получим

$$v = \frac{M + m}{m} \sqrt{2gh}.$$

2. Из баллистического пистолета, расположенного на высоте $h = 0,8$ м над поверхностью Земли, произвели три выстрела: вертикально вверх, вертикально вниз и горизонтально. Определите модули скоростей снарядов при достижении ими поверхности Земли, если начальная скорость снаряда во всех трех случаях равна $v_0 = 3$ м/с. Сопротивление воздуха не учитывать.

Решение. Применим закон сохранения энергии для замкнутой системы тел «снаряд — Земля», в которой действует только сила тяжести (консервативная сила):

$$mgh + \frac{mv_0^2}{2} = \frac{mv^2}{2},$$

откуда сразу получим, что модуль скорости снаряда в момент его приземления не зависит от направления начальной скорости и равен

$$v = \sqrt{v_0^2 + 2gh}; \quad v = 5 \text{ м/с}.$$

Эту задачу можно решить без применения закона сохранения энергии, на основе уравнений кинематики для равноускоренного движения тел под действием силы тяжести (динамическим методом). В этом случае задача распадается на три задачи с различными начальными условиями: v_0 направлена вертикально вверх, вертикально вниз, горизонтально. Решите эту задачу самостоятельно. Вы убедитесь в преимуществе энергетического способа, разумеется, когда существуют условия его применения.

■ УПРАЖНЕНИЕ 3

1. Шофер выключил двигатель автомобиля при скорости 72 км/ч. Через 3,4 с после этого автомобиль остановился. Сила трения колес об асфальт равна 5880 Н. Чему был равен импульс автомобиля в момент выключения двигателя? Какова масса автомобиля?
2. Автомобиль массой 2 т движется со скоростью 36 км/ч. Какое время требуется для полной остановки автомобиля после выключения двигателя, если сила трения колес о дорогу равна 5880 Н?
3. При формировании железнодорожного состава три сцепленных вагона, движущихся со скоростью 0,4 м/с, сталкиваются с неподвижным вагоном, после чего все вагоны продолжают двигаться в ту же сторону. Найдите скорость вагонов, если у всех вагонов одинаковая масса.
4. Зенитный снаряд, выпущенный в вертикальном направлении, достигнув максимальной высоты, взорвался. При этом образовалось три осколка. Два из них разлетелись под прямым углом друг к другу, причем скорость одного из них массой 9 кг равна 60 м/с, а

- другого массой 18 кг — 40 м/с. Третий осколок отлетел со скоростью 200 м/с. Определите графически направление полета третьего осколка. Какова его масса?
5. К грузу массой 31 кг, скользящему с трением по горизонтальной поверхности, приложена сила 200 Н, направленная под углом 60° к горизонту. Чему равна работа силы при перемещении тела, равном 5 м, если движение тела прямолинейное и равномерное? Каков коэффициент трения груза о плоскость?
6. Лыжник массой 70 кг поднимается на подъемнике вдоль склона длиной 180 м, образующего с горизонтом угол 60° . Вычислите работу силы тяжести, действующей на лыжника. Какой она имеет знак? Какую работу совершает сила натяжения каната подъемника? Скорость подъемника постоянная.
7. К пружине, верхний конец которой закреплен, подвешено тело массой 18 кг. При этом длина пружины равна 10 см. Когда же к ней подвешено тело массой 30 кг, ее длина равна 12 см. Вычислите работу, которую совершает внешняя сила при растяжении пружины от 10 до 15 см. Какую работу совершает при этом сила упругости?
8. Сжатая пружина, жесткость которой 10 000 Н/м, действует на прикрепленное к ней тело с силой 400 Н. Чему равна потенциальная энергия пружины? Какая работа была совершена внешней силой при ее сжатии? Какую работу совершит сила упругости пружины, если дать ей возможность восстановить первоначальную форму?
9. Снаряд, получивший при выстреле из орудия начальную скорость 280 м/с, летит вертикально вверх. На какой высоте его кинетическая энергия равна потенциальной?
10. Баба копра при падении с высоты 8 м обладает в момент удара о сваю кинетической энергией 18 000 Дж. Какова масса бабы копра?
11. Растянутая пружина, сокращаясь, увлекает за собой тело массой 50 кг по горизонтальной плоскости без трения. В момент, когда деформация пружины равна нулю, скорость тела равна 5 м/с. На сколько была растянута пружина, если ее жесткость равна 10 000 Н/м?
12. Автомобиль массой 2000 кг движется по горизонтальной дороге со скоростью 72 км/ч. Сила сопротивления движению составляет 0,05 его веса. Определите, какую мощность развивает при этом двигатель.
13. С плотины гидростанции высотой 30 м каждую секунду падает вода массой 170 т. Электрическая мощность, которую вырабатывает электростанция, равна 10 МВт. Чему равен КПД превращения механической энергии в электрическую?

Самое важное в пятой главе

О значении законов сохранения. Законы сохранения импульса и энергии, с которыми мы ознакомились в главах 4 и 5, имеют глубокий смысл. Они означают, что движение материи не может быть ни уничтожено, ни создано вновь.

В самом деле, когда движущееся тело останавливается, то можно как будто бы сказать, что его движение исчезло. Когда покоящееся тело начинает двигаться, то все выглядит так, как будто бы возникло новое движение, которого прежде не было. Но законы сохранения импульса и энергии показывают, что это не так. Ведь если движущееся тело остановилось, то это произошло не без причины. Остановка вызвана действием какого-то другого тела, действием какой-то силы. Если это сила трения, то это значит, что вместо исчезнувшего механического движения появилось другое движение — движение частиц внутри тела. Если причина остановки — сила тяжести или сила упругости, то вместо одного механического движения появляется другое механическое движение — движение другого тела, которому остановившееся

еся тело передало свой импульс и энергию, или движение того же тела в противоположном направлении.

Таким образом, движение может менять свою форму, оно может передаваться от одного тела к другому, но при всех таких изменениях выполняются законы сохранения импульса и энергии. Не может быть явления, процесса в природе, в котором такие характеристики движения, как энергия и импульс, возникли бы или исчезли без всякой компенсации. Это и означает, что *сохраняется движение материи*.

Существуют и другие характеристики движения, например скорость. Но сохранение движения не означает, что если у одного тела уменьшилась скорость, то у какого-то другого тела скорость должна на столько же увеличиться. Природа «устроена» так, что импульс и энергия в замкнутых системах тел остаются неизменными.

Мы видели, что законы сохранения импульса и энергии позволяют решать задачи механики, когда почему-либо неизвестны значения сил, действующих на тела.

Но значение законов сохранения этим не ограничивается. Законы сохранения импульса и энергии, насколько сейчас известно, абсолютно точны. Этого нельзя, например, сказать о втором и третьем законах Ньютона.

Известно, что, если частицы движутся со скоростями, близкими к скорости света, законы Ньютона выглядят иначе. Законы Ньютона в этом смысле являются приближенными. Законы же сохранения импульса и энергии не имеют исключений. Если кто-нибудь заявит об открытии им явления или процесса, при котором законы сохранения не соблюдаются, то можно смело утверждать, что это ошибка.

Законы сохранения служат путеводной звездой при рассмотрении любых вопросов, связанных с изучением природы. Это своего рода первичный контроль за правильностью любого утверждения. Этими законами мы будем пользоваться во всех разделах курса физики.

Движение, которое повторяется

Своеобразные движения, которые называются колебательными или просто колебаниями, всем хорошо известны. Они широко распространены в окружающей нас жизни. Колеблются ветки деревьев во время ветра, качели, отклоненные от вертикали, вагоны на рессорах при движении и т. д.

Всякая система, которая может совершать (но может и не совершать!) колебательные движения, называется *колебательной системой*. Тело, скрепленное с пружиной, — одна из таких систем. С движением этой системы мы прежде всего и ознакомимся.

§ 21 Колебания тела на пружине

На рисунке 25, а показана пружина и скрепленное с ней тело. Пружина пока не деформирована (не сжата и не растянута), так что на тело сила упругости не действует. Будем считать, что сила трения тела об опору равна нулю. Сила тяжести уравновешена силой реакции опоры. Вся система находится в состоянии равновесия.

Направим координатную ось X вдоль опоры, а за начало отсчета примем центр тяжести тела в положении равновесия ($x = 0$).

Отведем тело влево от положения равновесия на некоторое расстояние A (рис. 25, б). Пружина окажется сжатой, и на тело будет действовать сила упругости, направленная вправо. Отпустим тело и пружину. Тело станет двигаться с ускорением вправо и дойдет до положения равновесия, но не остановится в нем, а вследствие инерции перейдет его и отклонится вправо на расстояние, тоже равное A (рис. 25, в). Теперь пружина растянута, на тело действует сила, направленная влево, куда тело после мгновенной остановки и начнет двигаться. Оно снова пройдет через положение равновесия (теперь уже справа налево) и опять отклонится от него на расстояние A , т. е. вернется в точку, откуда оно начало свое движение (рис. 25, г). Завершено одно колебание, и начинается следующее, во всем на него похожее.

Мы видим, что в любой точке траектории колеблющегося тела сила упругости направлена к положению равновесия, т. е. противоположно отклонению от него. Эта сила пропорциональна отклонению x , и ее проекция на ось X равна: $(F_{\text{упр}})_x = -kx$. Отклонение тела от положения равновесия называют *смещением*.

Механические колебания, которые происходят под действием силы, пропорциональной смещению и направленной противоположно ему, называют *гармоническими колебаниями*.

Амплитуда колебания. Из описания гармонического колебания видно, что траектория такого колебательного движения — прямая. При этом колеблющееся тело не удаляется от положения равновесия на расстояние, большее, чем A . Это наибольшее (по модулю) отклонение тела от положения равновесия называется *амплитудой* колебания. Она зависит только от того, на сколько тело было отведено от положения равновесия перед тем, как его предоставили самому себе.

Период и частота колебаний. На то, чтобы совершить одно полное колебание, требуется определенное время. Продолжительность одного полного колебания называется *периодом* колебания. Обозначают период буквой T и выражают в секундах. Колебания характеризуются также *частотой* колебаний. Частота колебаний — это число колебаний в едини-

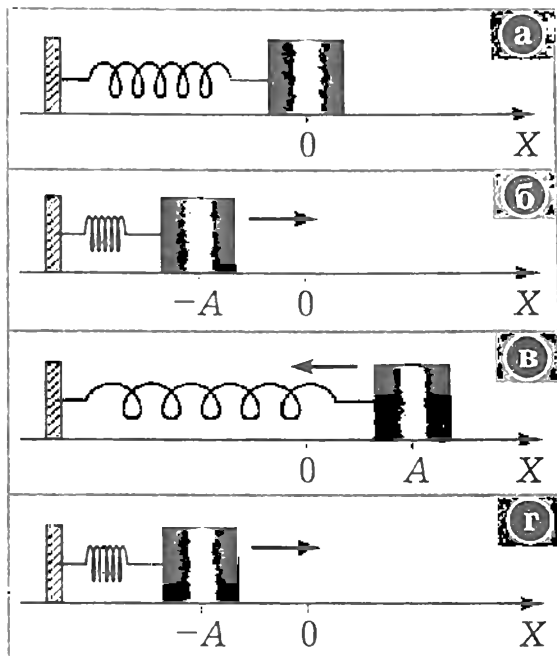


Рис. 25

цу времени. Обозначают частоту греческой буквой ν . За единицу частоты принимают частоту такого колебания, при котором в единицу времени совершается одно колебание. Эта единица называется герц (Гц): $1 \text{ Гц} = 1 \text{ с}^{-1}$.

Между периодом колебания и его частотой связь, очевидно, такая же, как и между периодом обращения тела по окружности и частотой обращения:

$$\nu = \frac{1}{T}; T = \frac{1}{\nu}.$$

Скорость и ускорение при колебательном движении. Как и другие движения, колебательное движение характеризуется скоростью и ускорением. При колебательном движении обе эти величины *изменяются* от точки к точке, от одного момента времени к другому. Так, в точках максимального отклонения от положения равновесия ($x = A$ и $x = -A$) скорость равна нулю — в этих точках тело останавливается, чтобы начать движение в обратном направлении. В точке равновесия скорость максимальная. Ускорение, наоборот, в точке равновесия равно нулю, потому что в этой точке сила равна нулю. В точках же, соответствующих максимальному отклонению от положения равновесия ($x = A$ и $x = -A$), ускорение максимальное, потому что в этих точках сила упругости максимальна. Итак, скорость и ускорение, как и координата, в колебательном движении изменяются периодически. Через каждый период T модуль и направление векторов скорости и ускорения повторяются.

§ 22 Энергия колебательного движения

Напомним, что потенциальная энергия сжатой или растянутой пружины равна $\frac{kx^2}{2}$, где k — жесткость пружины и x — ее удлинение. В нашем примере (см. рис. 25) в крайнем левом положении удлинение пружины $x = -A$, следовательно, потенциальная энергия равна $\frac{kA^2}{2}$. Кинетическая энергия в этот момент равна нулю, потому что нулю равна скорость. Значит, потенциальная энергия $\frac{kA^2}{2}$ — это *полная механическая энергия* системы в этот момент.

Так как мы условились, что сила трения равна нулю, а другие силы уравновешены, то нашу систему можно считать замкнутой и ее полная энергия при движении не может измениться. Когда тело при своем движении окажется в крайнем правом положении ($x = A$), его кинетическая энергия снова будет равна нулю и полная энергия опять равна потенциальной. А полная энергия не может измениться. Значит, она снова равна $\frac{kA^2}{2}$. Это и означает, что и вправо тело отклонится на расстояние, равное A .

В положении равновесия, напротив, потенциальная энергия равна нулю, *потому* что $x = 0$ (пружина не деформирована!). В этом положении

полная энергия тела равна его кинетической энергии $\frac{mv_m^2}{2}$, где m — масса тела и v_m — его скорость (она в этот момент максимальна!). Но эта кинетическая энергия тоже должна иметь значение, равное $\frac{kA^2}{2}$.

При колебательном движении происходит, следовательно, превращение кинетической энергии в потенциальную и обратно. В любой же точке между положениями равновесия и максимального отклонения тело обладает и кинетической энергией и потенциальной, но их сумма, т. е. полная энергия в любом положении тела, равна $\frac{kA^2}{2}$. Полная механическая энергия W колеблющегося тела пропорциональна квадрату амплитуды его колебаний:

$$W = \frac{kA^2}{2}.$$

Из закона сохранения энергии следует интересное соотношение между амплитудой колебаний A и максимальной скоростью v_m колеблющегося тела (оно нам будет необходимо в дальнейшем).

Как мы видели,

$$\frac{mv_m^2}{2} = \frac{kA^2}{2}.$$

Отсюда

$$\frac{A^2}{v_m^2} = \frac{m}{k}, \quad \text{или} \quad \frac{A}{v_m} = \sqrt{\frac{m}{k}}.$$

§ 23 Геометрическая модель колебательного движения

Как и для всякого движения, для колебаний нужно получить формулу, позволяющую решать основную задачу механики — определять координату в любой момент времени. Кроме того, поскольку колебания — движение периодическое, нужно уметь вычислять период колебаний.

Чтобы найти зависимость координаты колеблющегося тела от времени, нужно, как мы знаем, решить уравнение второго закона Ньютона. Но сила, действующая на колеблющееся тело, переменная, и решить уравнение обычным алгебраическим способом нельзя.

Но мы все же найдем и формулу для координаты и формулу для периода, если рассмотрим вместо движения тела, скрепленного с пружиной, вполне сходное с ним движение.

Пусть маленький шарик M равномерно движется по окружности со скоростью v . Радиус окружности мы на этот раз обозначим буквой A .

Движение шарика по окружности — это тоже движение периодическое. Ведь шарик через определенный промежуток времени T (период обращения) оказывается в том же самом месте. Но это движение не колебательное, и оно не похоже на движение тела, скрепленного с пружиной: тело на пружине движется «туда-сюда», а шарик — только «туда», по часовой стрелке или против часовой стрелки.

Рассмотрим, однако, не движение шарика, а движение его проекции на горизонтальный диаметр окружности. Вдоль диаметра направим координату

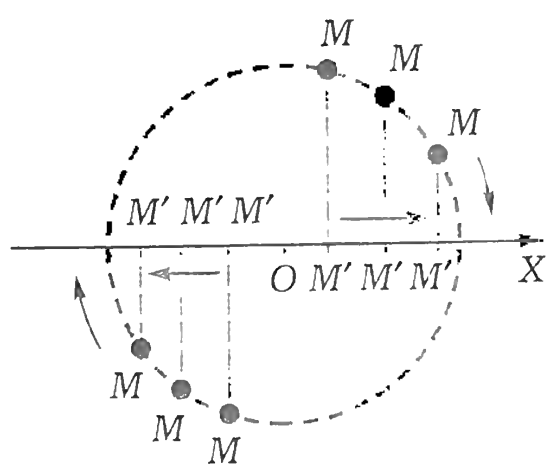


Рис. 26

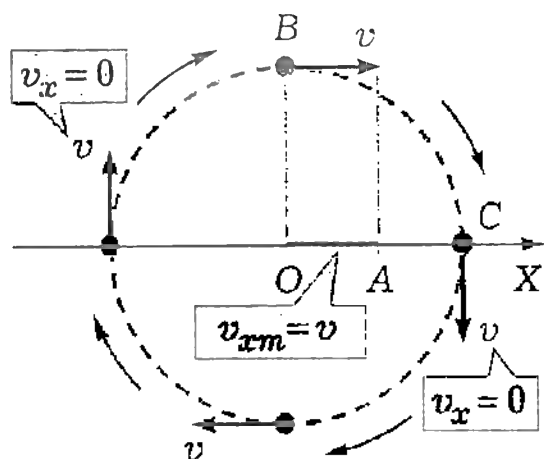


Рис. 27

натную ось X с началом отсчета в центре O окружности (рис. 26). Из рисунка видно, что при движении шарика по окружности его проекция M' совершает колебания вдоль диаметра, т. е. вдоль оси X . Именно такое колебательное движение мы увидим, если станем смотреть на шарик «сбоку», поместив глаз в плоскости обращения. Ясно, что движение проекции — это точная геометрическая модель колебательного движения тела (его центра тяжести), скрепленного с пружиной. Центр окружности O здесь играет роль точки равновесия ($x = 0$). Амплитуда колебания проекции M' равна радиусу A окружности. А период колебания T равен периоду обращения шарика по окружности.

Скорость движения проекции M' тоже «ведет себя» совершенно так же, как скорость тела, прикрепленного к пружине. В тот момент, когда шарик при своем движении проходит точку B (рис. 27), скорость его равна v и направлена параллельно оси X . В этот момент проекция M' проходит через центр окружности O и проекция v_x скорости по модулю равна v . Это максимальное значение скорости про-

екции M' : $v_{xm} = v$. Когда шарик M проходит точку C , скорость шарика по модулю равна v , но направлена перпендикулярно оси X , так что проекция скорости равна нулю. Таким образом, в положении $x = 0$ скорость максимальна, а в положении $x = A$ она равна нулю. Так же изменяется и скорость колеблющегося тела на пружине. Это подобие движения тела, прикрепленного к пружине, и проекция тела, равномерно движущегося по окружности, позволяет нам получить формулы для координаты и периода колеблющегося тела.

Период колебаний. Период обращения шарика по окружности мы найдем, если разделим длину окружности $2\pi A$ на скорость движения v : $T = \frac{2\pi A}{v_{xm}}$. Но T — это период колебания проекции M' , а скорость v — это в то же время максимальная скорость движения проекции: $v_{xm} = v$. Следовательно, мы можем написать:

$$T = \frac{2\pi A}{v_{xm}}.$$

В предыдущем параграфе мы получили выражение для отношения амплитуды колебания к максимальной скорости: $\frac{A}{v_m} = \sqrt{\frac{m}{k}}$. Ввиду полного сходства колебаний проекции тела, равномерно движущегося по окружности, и тела, скрепленного с пружиной, мы можем **написать** для периода колебаний формулу:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}. \quad (1)$$

Период колебаний тела, скрепленного с пружиной, тем больше, чем больше масса тела, и тем меньше, чем больше жесткость пружины. От амплитуды колебаний период колебаний не зависит.

Как изменяется координата колеблющегося тела со временем? Обратимся опять к движению шарика по окружности и к движению его проекции на горизонтальный диаметр (рис. 28). Пусть в какой-то момент времени шарик находится в точке B . Проекция его в этот момент проходит через центр окружности O . Проведем в точку B радиус A . Через некоторый промежуток времени t шарик оказался в точке C , а его проекция в точке C' , так что координата шарика равна x . Проведем радиус и в точку C . За время t шарик прошел путь $l = BC$, а его проекция совершила перемещение, равное x . При этом радиус, проведенный к шарiku, повернулся на угол φ . Из треугольника OCC' находим, что $\frac{x}{A} = \sin \varphi$, отсюда

$$x = A \sin \varphi. \quad (2)$$

Угол φ — это центральный угол. Дуга, стягивающая центральный угол, как известно из геометрии, равна произведению угла на радиус окружности, поэтому мы можем написать: $l = A\varphi$. С другой стороны, $l = vt$, а $v = \frac{2\pi A}{T}$, так что для l мы получаем еще одно выражение: $l = \frac{2\pi A}{T} t$. Приравнявая оба выражения для l , находим:

$$A \cdot \varphi = \frac{2\pi A}{T} t,$$

или

$$\varphi = \frac{2\pi}{T} t.$$

Подставив это значение φ в формулу (2), получаем:

$$x = A \sin \frac{2\pi}{T} t. \quad (3)$$

Эта формула показывает, как координата колеблющегося тела изменяется со временем. Это и есть решение основной задачи механики для колебательного движения.

Формулу (3) можно получить из определения гармонического колебания ($F_x = -kx$), данного в § 21. Следовательно, можно определить гармоническое колебание, используя эту формулу. Если физическая величина (координата, скорость, ускорение и т. д.) изменяется по закону $x = x_0 \sin \frac{2\pi}{T} t$ (или $x = x_0 \cos \frac{2\pi}{T} t$), то она изменяется по гармоническому закону.

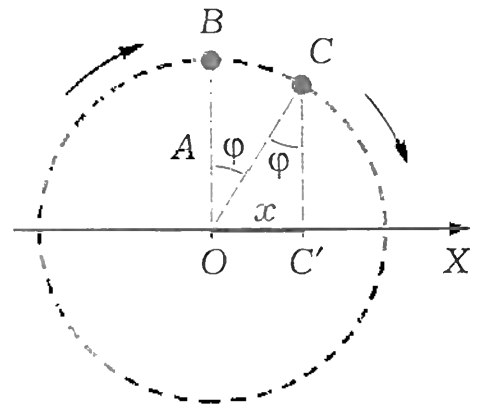


Рис. 28

■ ЗАДАНИЯ

1. Выведите формулу для определения частоты колебаний тела, скрепленного с пружиной.
2. Напишите формулу (3) так, чтобы в нее входил не период T колебания, а частота ν колебаний.

■ УПРАЖНЕНИЕ 4

1. Чему равна частота колебаний тела массой 100 г, прикрепленного к пружине, жесткость которой равна 40 Н/м?
2. Чему равна жесткость пружины, если скрепленное с ней тело массой 30 г совершает 300 колебаний за 1 мин?
3. Тело, прикрепленное к пружине, совершает колебания с некоторым периодом T . Если увеличить массу тела на 60 г, то период колебаний удваивается. Какова первоначальная масса тела?

§ 24 Математический маятник

Мы рассмотрели пример колебательного движения, которое происходило под действием силы упругости.

Познакомимся с другой колебательной системой, в которой гармонические колебания происходят под действием нескольких сил.

Математическим маятником называется подвешенный к тонкой нити груз, размеры которого много меньше длины нити, а его масса много больше массы нити. Это значит, что тело (груз) и нить должны быть такими, чтобы груз можно было считать материальной точкой, а нить невесомой.

Когда нить с подвешенным к ней грузом занимает вертикальное положение, маятник покоится. Это его положение равновесия (рис. 29). Если отвести маятник в сторону, например, до положения A (рис. 30, a) и отпустить, он начнет совершать колебания.

Если отклонить маятник на достаточно малый угол, например не до точки A , а до точки B (рис. 30, b), то дуга будет очень мало отличаться от прямой (от хорды). При малых углах отклонения колебания математического маятника становятся похожими на колебания тела, прикрепленного к пружине (систему «тело — пружина» часто называют пружинным маятником). А причина сходства в том, что сходны силы, вызывающие колебания в обеих системах.

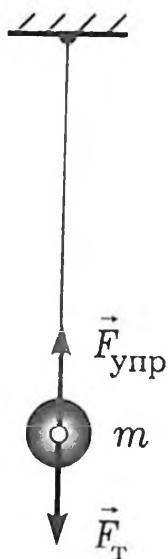


Рис. 29

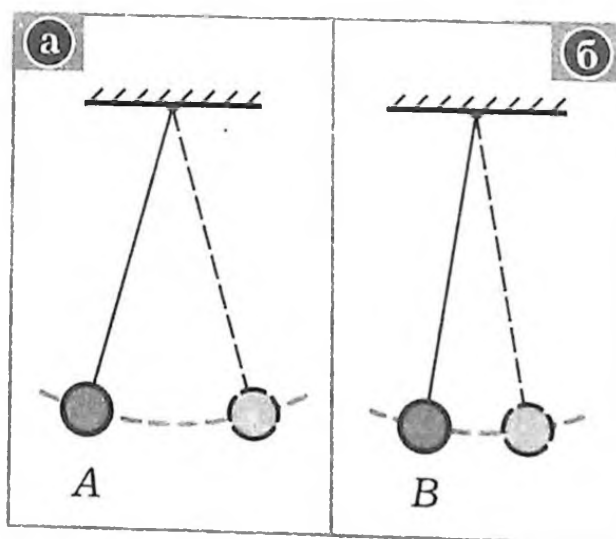


Рис. 30

Сила, вызывающая колебания маятника. В положении равновесия (см. рис. 29) на подвешенный к нити груз действуют сила тяжести $\vec{F}_T = m\vec{g}$ и сила упругости $\vec{F}_{\text{упр}}$ натянутой нити. Маятник покоится, значит, эти силы уравнивают одна другую:

$$\vec{F}_T + \vec{F}_{\text{упр}} = 0. \quad (1)$$

Но вот маятник отклонен на малый угол α (рис. 31). На груз по-прежнему действуют силы $\vec{F}_T$ и $\vec{F}_{\text{упр}}$. Но теперь они не уравновешены. Их равнодействующая $\vec{F}$ направлена по касательной к дуге $\overset{\frown}{AE}$. Если угол α , как мы условились, мал, то дуга $\overset{\frown}{AE}$, по которой движется груз, очень мало отличается от полухорды AB .

Вместо равенства (1) мы должны теперь написать:

$$\vec{F} = \vec{F}_T + \vec{F}_{\text{упр}}. \quad (2)$$

Модуль силы $\vec{F}$ равен проекции силы тяжести на касательную к дуге $\overset{\frown}{AE}$, проведенной от точки A , так как проекция силы упругости на эту касательную равна нулю. Из рисунка 31 видно, что $F = mg \sin \alpha = mg \frac{AB}{OA}$, где $OA = l$ — длина подвеса.

Как было отмечено, при малых углах длина полухорды AB мало отличается от длины дуги $\overset{\frown}{AE}$, где $AE = x$ — отклонение груза от положения равновесия.

Следовательно, $F \approx mg \frac{AE}{l} = mg \frac{x}{l}$, а с учетом того, что сила направлена в сторону, противоположную отклонению, можно записать:

$$F_x = -\frac{mg}{l} x. \quad (3)$$

Период колебаний маятника. Из формулы (3) видно, что сила F очень похожа на силу упругости, заставляющую колебаться пружинный маятник $((F_{\text{упр}})_x = -kx)$. Разница только в том, что вместо жесткости пружины k здесь стоит величина $\frac{mg}{l}$. Как и сила $\vec{F}_{\text{упр}}$, сила $\vec{F}$ пропорциональна отклонению x тела от положения равновесия и направлена в сторону, противоположную смещению $(F_x = -\frac{mg}{l} x)$. В этом и состоит причина сходства движения математического и пружинного маятников. Одинаковые причины приводят к одинаковым следствиям. В таком случае значение периода колебаний математического маятника мы получим, если в формулу $T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$ вместо k подставим $\frac{mg}{l}$. Тогда период T колебаний математического маятника будет равен:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}. \quad (4)$$

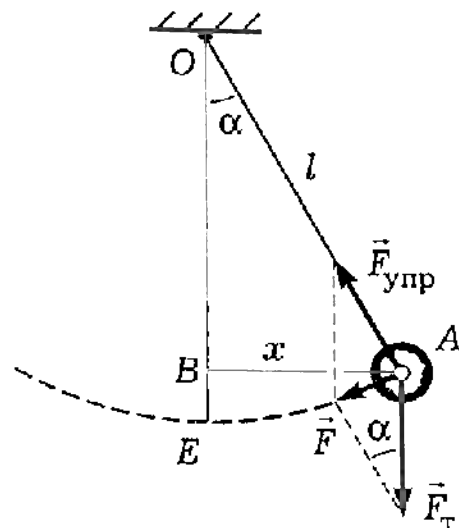


Рис. 31

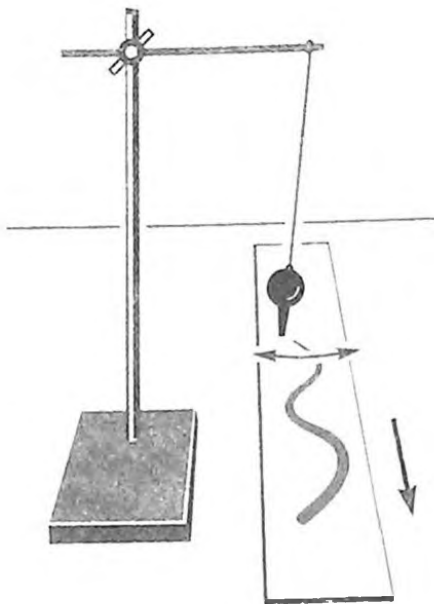


Рис. 32

Из формулы (4) видно, что период колебаний математического маятника не зависит от массы подвешенного груза и амплитуды колебаний (если она мала!).

В данном месте Земли, где ускорение свободного падения g есть постоянная величина, период колебания маятника определяется только длиной его подвеса.

Поскольку любой маятник имеет вполне определенный период колебаний, маятники используют для регулировки хода часов.

Маятник находит также много важных применений в геологической разведке и многих других областях деятельности.

График гармонического колебания. Более наглядное представление о характере гармонического колебания можно получить из графика движения маятника. Изобразить такой график можно «поручить» самому колеблющемуся телу. Для этого к нему прикрепляют какое-нибудь легкое пишущее устройство (карандаш, перо), а под ним помещают бумажную ленту. Если во время колебаний маятника ленту двигать с некоторой постоянной скоростью в направлении, перпендикулярном направлению колебаний, то на ней появится кривая, каждая точка которой соответствует положению пера, а значит, и тела в различные моменты времени. На рисунках 32 и 33 показаны устройство для получения графика и сам график. Кривая, графически изображающая зависимость координаты от времени, называется *синусоидой*. Ранее мы установили, что координата x изменяется по закону *синуса* (формула 3, § 23).

Тот же результат (синусоиду) можно получить совсем просто. Возьмите в руки мел и чертите им на доске вверх-вниз, одновременно двигаясь вдоль доски (по возможности равномерно).

Вычерчивая таким способом график колебаний, мы, как говорят, «развертываем» колебание во времени. Равномерное движение бумажной ленты как бы символизирует течение времени. Такие графики-развертки

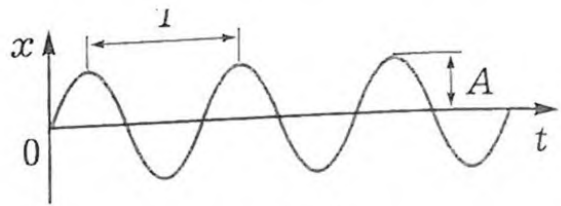


Рис. 33

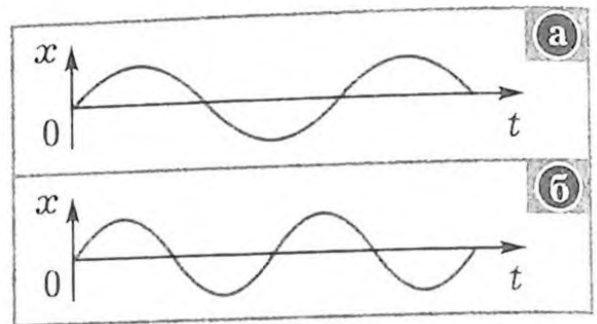


Рис. 34

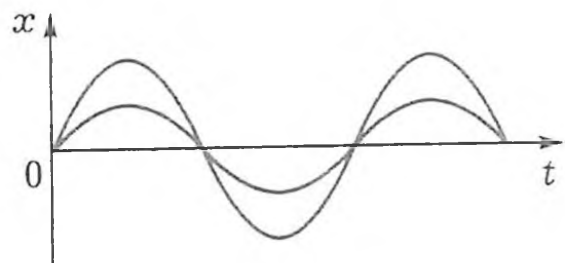


Рис. 35

очень наглядно показывают основные характеристики колебательного движения — амплитуду, период, а значит, и частоту (см. рис. 33). По графикам колебаний удобно сравнивать различные виды колебаний. На рисунке 34, а, б, например, показаны два колебания с одинаковой амплитудой, но с разными частотами, на рисунке 35 — колебания с одинаковыми частотами, но с разными амплитудами.

Напомним еще раз, что формула (3) и графики на рисунках 33—35 относятся к случаям, когда угол отклонения маятника от вертикали (т. е. от положения равновесия) мал. Он не должен превышать $5\text{--}10^\circ$.

■ УПРАЖНЕНИЕ 5

1. Маятник совершает 24 колебания за 30 с. Чему равны период и частота его колебаний?
2. Длина подвеса маятника 98 м. С какой частотой он колеблется? Чему равна амплитуда колебаний маятника, если он отклонен от вертикали на 5° ?
3. Маятник, который на Земле совершал свободные колебания с частотой 0,5 Гц, был доставлен космонавтами на Луну. С какой частотой маятник будет колебаться на поверхности Луны, где ускорение свободного падения в 6 раз меньше, чем на Земле?
4. Два маятника отклонены от своих положений равновесия и одновременно отпущены. Первый маятник с длиной подвеса 4 м совершил за некоторый промежуток времени 15 колебаний. Второй за это же время совершил 10 колебаний. Какова длина второго маятника?

§ 25 Колебания и внешние силы

Мы познакомились с двумя колебательными системами — с пружинным и математическим маятниками. В этих системах, когда они выведены из состояния равновесия, возникают колебания, очень похожие друг на друга, — гармонические колебания. При этом мы считали, что колебательное движение определяется в них *только* силами, действующими в самой системе. В пружинном маятнике — это сила упругости деформированной пружины. В математическом маятнике — это сила упругости натянутой нити и сила тяжести. Сходством этих сил и объясняется сходство движений в обеих системах. Внешние силы, в частности сила трения, на системы не действуют.

Колебания в таких системах, не подверженных действию внешних сил, называются *свободными*. Иногда их называют также *собственными* колебаниями.

Свободные колебания — «вечные» колебания. Колебательные системы, на которые не действуют внешние силы, — это замкнутые системы. А в замкнутой системе полная энергия сохраняется, происходит только превращение потенциальной энергии в кинетическую и обратно. Энергия колебаний определяется квадратом амплитуды колебаний. Поэтому свободные колебания — это колебания с *постоянной амплитудой*. Маятник, выведенный из положения равновесия, должен колебаться вечно!

Влияние силы трения. Затухание колебаний. Иногда действительно можно наблюдать колебания, длящиеся поразительно долго. Например, длинный маятник, отклоненный на малый угол, может в течение многих часов совершать колебания с постоянной амплитудой. Однако, как бы долго ни продолжались свободные колебания маятника, он в конце концов все-таки останавливается, колебания, как говорят, затухают. «Виновата» в этом сила трения, которая в реальных земных условиях действует на все, что движется.

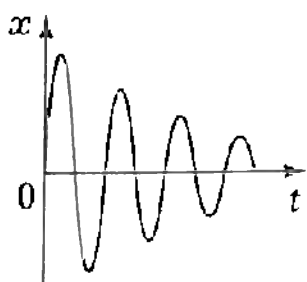


Рис. 36

Действие силы трения приводит к уменьшению энергии маятника, а следовательно, к уменьшению амплитуды. В этом уменьшении амплитуды и состоит затухание колебаний. На рисунке 36 показан график такого затухающего колебания. Если сила трения достаточно велика, колебания вообще не возникают. Отклоненный от положения равновесия маятник просто постепенно возвращается в это положение.

Вынужденные колебания. Затухающие колебания нельзя считать свободными колебаниями, поскольку свободные колебания — это колебания с постоянной амплитудой.

Рассмотрим теперь случай, когда на колебательную систему действует внешняя сила, но не постоянная сила трения, а некоторая *периодически изменяющаяся* сила. Приведем такой пример. Стержень с небольшим изгибом (рис. 37) может вращаться в подшипниках с помощью рукоятки. К изгибу стержня прикреплен пружинный маятник. Направляющая щель дает возможность маятнику двигаться только вверх-вниз. Будем вращать стержень с некоторой постоянной частотой. Тогда на пружинный маятник будет действовать сила, которая изменяется периодически с той частотой, с которой вращается стержень. Как будет двигаться груз на пружине? Пружина с грузом — это колебательная система. У нее «свой» период колебаний $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ и «своя» частота $\nu = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}}$ (этот период и эту частоту

обычно называют собственным периодом, собственной частотой). Но сила, которая создается при вращении рукоятки, будет «навязывать» маятнику свою частоту, свой период колебаний. Колебания, которые совершает колебательная система при воздействии внешней периодической силы, называются *вынужденными колебаниями*, а периодическая сила, вызывающая такие колебания, называется *вынуждающей силой*. Итак, колебательная система, на которую действует внешняя периодическая сила, совершает вынужденные колебания. Частота вынужденных колебаний (период) равна частоте (периоду) вынуждающей силы.

Амплитуда вынужденных колебаний при данной частоте вынуждающей силы не изменяется, даже если на систему, кроме вынуждающей силы, действует и сила трения. Потеря энергии из-за трения восполняется за счет работы вынуждающей силы.

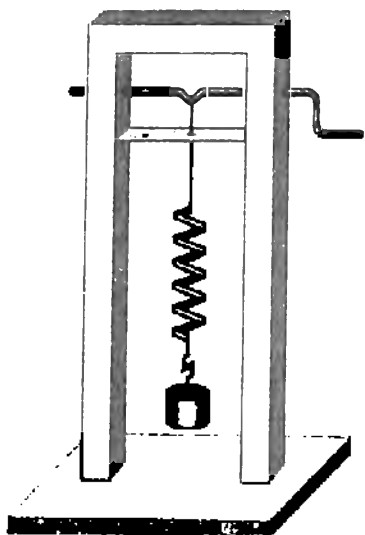


Рис. 37

Резонанс. Изменяя с помощью рукоятки (см. рис. 37) частоту вынуждающей силы и измеряя амплитуду колебаний груза на пружине, мы увидим, что, когда частота вынуждающей силы приближается к *собственной* частоте пружинного маятника, амплитуда колебаний резко возрастает. Амплитуда колебаний максимальна, когда частота вынуждающей силы равна собственной частоте маятника. При дальнейшем росте частоты вынуждающей силы амплитуда уменьшается. Это явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний при равенстве частот вынуждающей силы и собственной частоты

колебательной системы называется *резонансом*. На рисунке 38 показана зависимость амплитуды вынужденных колебаний от частоты вынуждающей силы. Амплитуда достигает максимума при определенном значении частоты $\nu = \nu_0$, где ν_0 и есть собственная частота колебательной системы. На резкость максимума сильно влияет сила трения. Кривая 1 соответствует малой силе трения: максимум очень резкий. Кривая 2 соответствует большой силе трения: резкого максимума нет.

В чем причина явления резонанса? Почему растет амплитуда колебаний, когда частота вынуждающей силы приближается к частоте собственной?

Совпадение частот означает, что сила упругости в самой системе действует «в такт» с вынуждающей силой. Если сила упругости и вынуждающая сила в какие-то моменты действуют в одном направлении, то они складываются и их действие усиливается. И даже если вынуждающая сила мала, она приведет к росту амплитуды. Ведь эта малая сила добавляется к силе упругости пружины каждый период.

Явление резонанса может быть полезным, поскольку оно позволяет получить даже с помощью малой силы большое увеличение амплитуды колебаний. С другой стороны, резонанс может оказаться вредным и даже опасным. Если, например, на фундаменте установлена машина, в которой какие-нибудь части совершают периодические движения, то они передаются фундаменту и он будет совершать вынужденные колебания. Фундамент — это тоже колебательная система со своей собственной частотой. И если частота периодических движений совпадет с собственной частотой фундамента, то амплитуда его колебаний может возрасти настолько, что это приведет к его разрушению. Поэтому с опасными результатами резонанса нужно бороться, т. е. его не допускать. Для этого нужно заранее рассчитать частоты колебаний машин, фундаментов, средств транспорта и т. д., с тем чтобы при обычных условиях их эксплуатации резонанс не мог наступить.

Автоколебания. Незатухающие колебания можно создать еще другим способом: колебательная система получает энергию порциями от внешнего источника, в котором колебания не совершаются. Такие колебания называются *автоколебаниями*.

Системы, в которых возбуждаются автоколебания, называются автоколебательными системами.

Типичным примером автоколебательной системы являются часы (рис. 39). В часах с маятником источником энергии служит гиря, поднятая на определенную высоту. Через анкер она толчками с помощью ходового колеса передает маятнику энергию, поддерживая его колебания.

Автоколебательная система отбирает необходимую ей энергию периодически, нужными

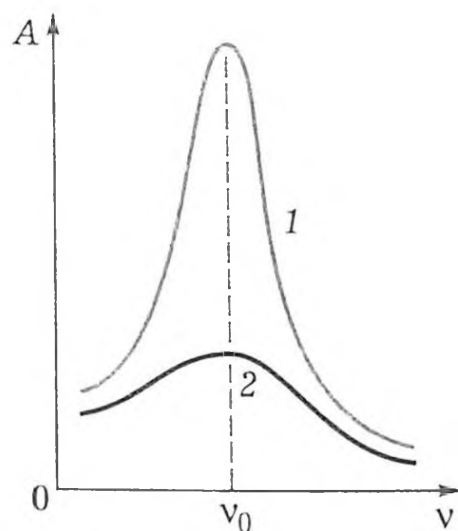


Рис. 38

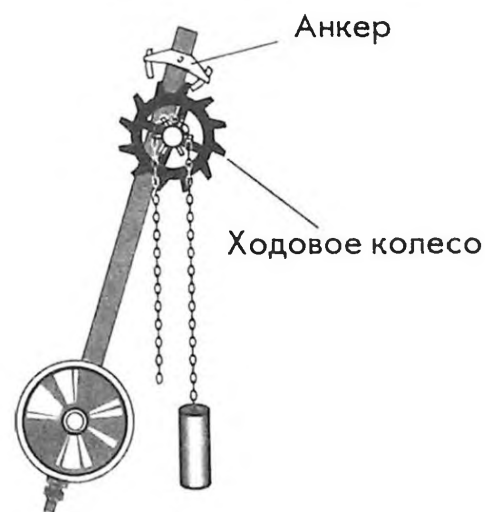


Рис. 39

порциями с частотой, равной собственной частоте колебательной системы. Этим автоколебательная система отличается от вынужденных колебаний.

Частота автоколебательной системы (как и свободных колебаний) определяется параметрами самой колебательной системы.

■ ВОПРОСЫ

1. Какие колебания называются свободными? В каких системах возникают свободные колебания? Каковы условия возникновения свободных колебаний? 2. Являются ли реальные колебания свободными? Поясните свой ответ. 3. Чем определяется период (частота) свободных колебаний? Чем определяется амплитуда свободных колебаний? 4. Какие колебания называются вынужденными? В каких системах возникают вынужденные колебания? Каковы условия возникновения вынужденных колебаний? 5. Чем определяется период (частота) вынужденных колебаний? 6. Что называется резонансом? При каких условиях происходит это явление? 7. Приведите примеры вредных проявлений резонанса. Каким образом это учитывается? 8. Приведите примеры полезных проявлений резонанса. Каким образом это используется? 9. Чем определяется амплитуда вынужденных колебаний? 10. Какие колебания называются автоколебаниями? В каких системах возникают автоколебания? Каковы условия возникновения автоколебаний?

■ УПРАЖНЕНИЕ 6

1. К концу пружины маятника, груз которого имеет массу 1 кг, приложена переменная сила. Частота ее колебаний равна 16 Гц. Будет ли при этом наблюдаться резонанс, если жесткость пружины 400 Н/м?

2. Период собственных вертикальных колебаний железнодорожного вагона равен 1,25 с. На стыках рельсов вагон получает периодические удары, вызывающие вынужденные колебания вагона. При какой скорости поезда возникнет резонанс, если длина каждого рельса между стыками 25 м?

3. Заполните таблицу:

Тип колебаний	Каковы условия возникновения колебаний?	Чем определяется период (частота) колебаний?	Чем определяется амплитуда колебаний?
Свободные			
Вынужденные			
Автоколебания			

Самое важное в шестой главе

В природе и технике большую роль играют *колебательные системы*, т. е. тела и устройства, которые, будучи выведены из состояния равновесия, совершают как бы «сами по себе» колебательное движение. Если при этом на систему не действуют внешние силы, эти колебания называются *свободными* или *собственными*.

Механическое колебательное движение — это движение, при котором координата колеблющегося тела, его скорость и ускорение повторяются через определенный промежуток времени, называемый *периодом* колебаний, или, что одно и то же, повторяются с определенной *частотой*. Между периодом T и частотой ν существует связь:

$$T = \frac{1}{\nu}; \quad \nu = \frac{1}{T}.$$

Период колебаний и частота колебаний пружинного маятника определяются соответственно формулами:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \quad \text{и} \quad \nu = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}}.$$

Период T колебаний и частота ν колебаний математического маятника определяются формулами:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}; \quad \nu = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{l}}.$$

Сила трения, которую нужно считать внешней силой, вызывает постепенное уменьшение амплитуды колебаний. Такие колебания называют *затухающими* колебаниями.

Если внешней силой, приложенной к системе, является периодически изменяющаяся сила, то система совершает *вынужденные* колебания. Частота вынужденных колебаний равна частоте вынуждающей силы. При равенстве частоты вынуждающей силы и собственной частоты колебательной системы происходит резонанс — резкое возрастание амплитуды вынужденных колебаний.

Возможны еще автоколебания. Они возникают, если колебательная система имеет возможность получать от внешнего источника нужную ей энергию порциями, с частотой, равной собственной частоте колебательной системы.

глава 7 Волны

Колебания передаются от точки к точке

Многим, наверное, приходилось видеть некошеное поле в ветренную погоду, когда, по словам поэта, «волнуется желтеющая нива». Глядя на такое поле, мы видим, что вдоль него что-то перемещается. Но что именно перемещается, неясно. Ведь стебли растений остаются на месте. Они лишь наклоняются, выпрямляются, снова наклоняются и т. д. Наблюдаемый нами процесс представляет собой *волну*.

Еще один пример. Возьмем длинный шнур и закрепим один его конец, а другой приведем в колебательное движение (рис. 40). Мы увидим, что вдоль шнура что-то «бежит», хотя концы шнура остаются на месте. То, что «бежит» по шнуру — это тоже волна (такого рода волны так и называются бегущими).

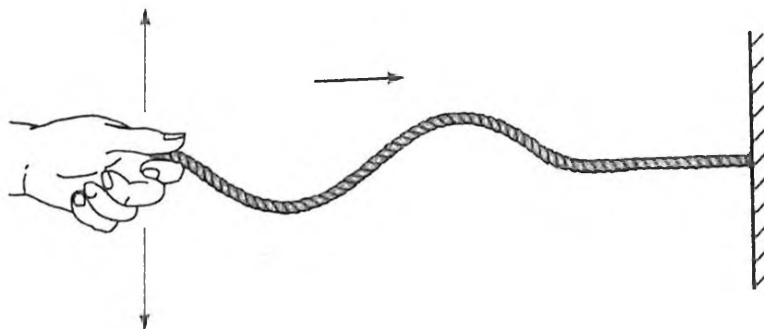


Рис. 40

§ 26 Что такое волна?

Что же распространяется вдоль поля, по воде, вдоль шнура?

Во всех трех примерах источником волн являются колебания. Колеблются стебли растений, деформируемые ветром, колеблются частицы воды, колеблется конец шнура. А колебания, возникшие в одном месте (например, на конце шнура), передаются другим частицам. То, что мы называем волной, и есть *распространение колебаний* от точки к точке, от частицы к частице.

Хорошей моделью образования волны в шнуре может служить цепочка маленьких шариков (точек), массой m каждый, между которыми действует сила упругости. Мы можем вообразить, что между шариками расположены маленькие пружинки (рис. 41).

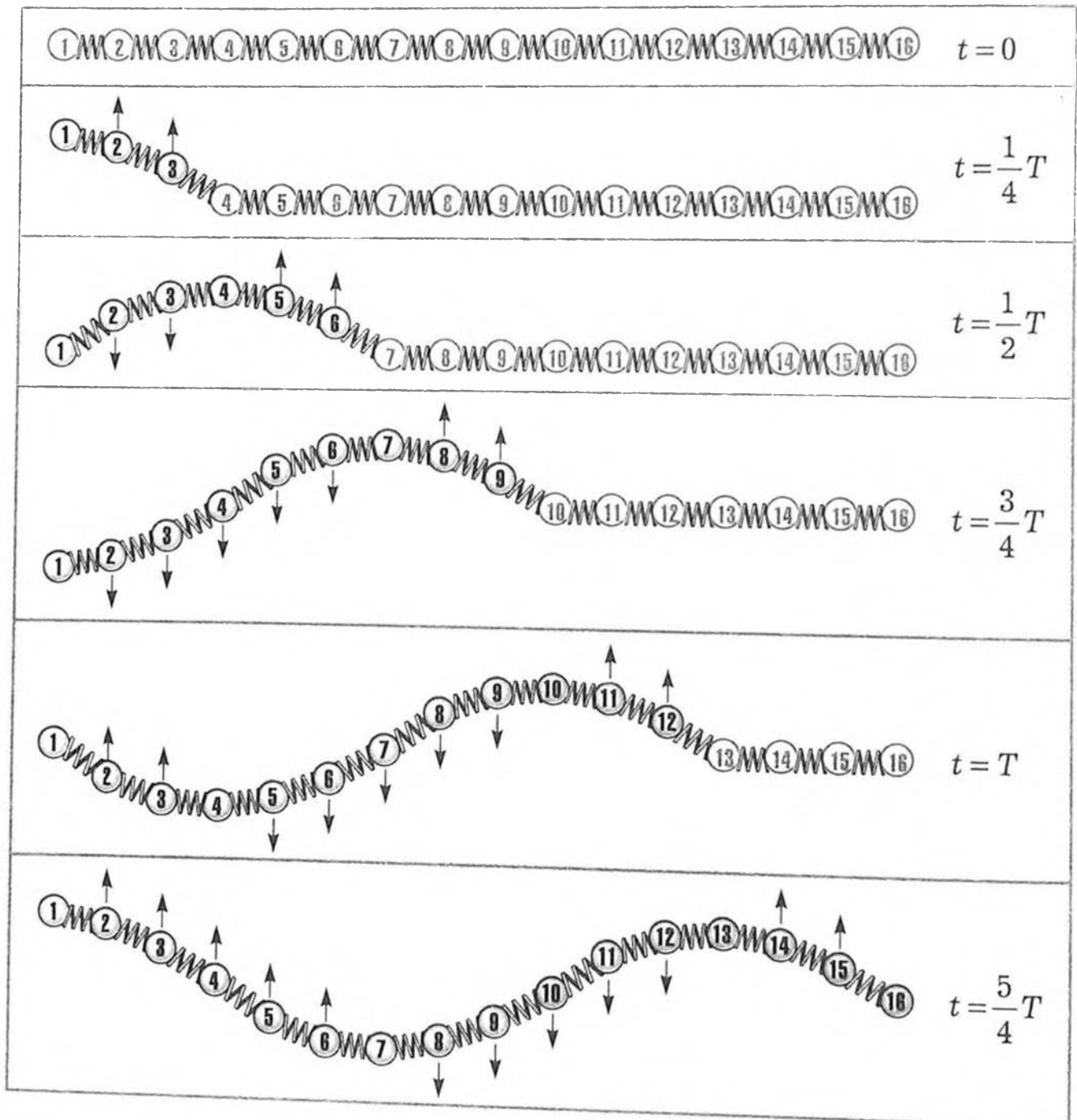


Рис. 41

Пусть точка 1 отведена вверх и отпущена. Пружинка, связывающая ее с точкой 2, при этом растянется, возникнет сила упругости, которая действует и на точку 2. Начнет, следовательно, колебаться и точка 2. Это приведет к деформации следующей пружинки, так что начнет совершать колебания и точка 3 и т. д. Так как у всех шариков одинаковые массы и у всех пружинки одинаковые жесткости, то все шарикомы будут колебаться (каждый около своего положения равновесия) с одинаковыми периодами и одинаковыми амплитудами. Однако начнут эти колебания неодновременно. Ведь все шарики обладают инертностью (у них есть масса!), и значит, на изменение их скорости требуется время. Поэтому вторая точка начнет колебаться позже, чем первая, третья — позже, чем вторая и т. д.

§ 27 Два вида волн

Вернемся еще раз к нашей модели — цепочке шариков и пружинок. Мы видели, как распространяются в виде волны колебания, вызванные тем, что первая в цепи точка была отведена вверх, т. е. так, что эта точка, как и все остальные, колебалась вдоль вертикальных прямых. Колебания же распространялись вдоль горизонтальной линии. Волна, распространяющаяся в направлении, перпендикулярном направлению колебаний частиц в волне, называется *поперечной*.

Но волну вдоль цепочки можно вызвать и иначе. Первый шарик можно отвести не вверх или вниз, а вправо или влево. Это тоже заставило бы его колебаться, и эти колебания передавались бы вдоль цепочки, образуя волну. Но теперь частицы колеблются вдоль горизонтальной прямой, и вдоль этой же прямой распространяются колебания (рис. 42). Волна, в которой колебания происходят вдоль той же прямой, что и их распространение, называется *продольной волной*.

Когда в цепочке возбуждается поперечная волна (см. рис. 41), это приводит к видимому изменению формы цепочки. На ней появляются горбы и впадины. Когда же в той же цепочке возникает продольная волна (см. рис. 42), цепочка остается прямой, но в ней образуются сгущения и разрежения.

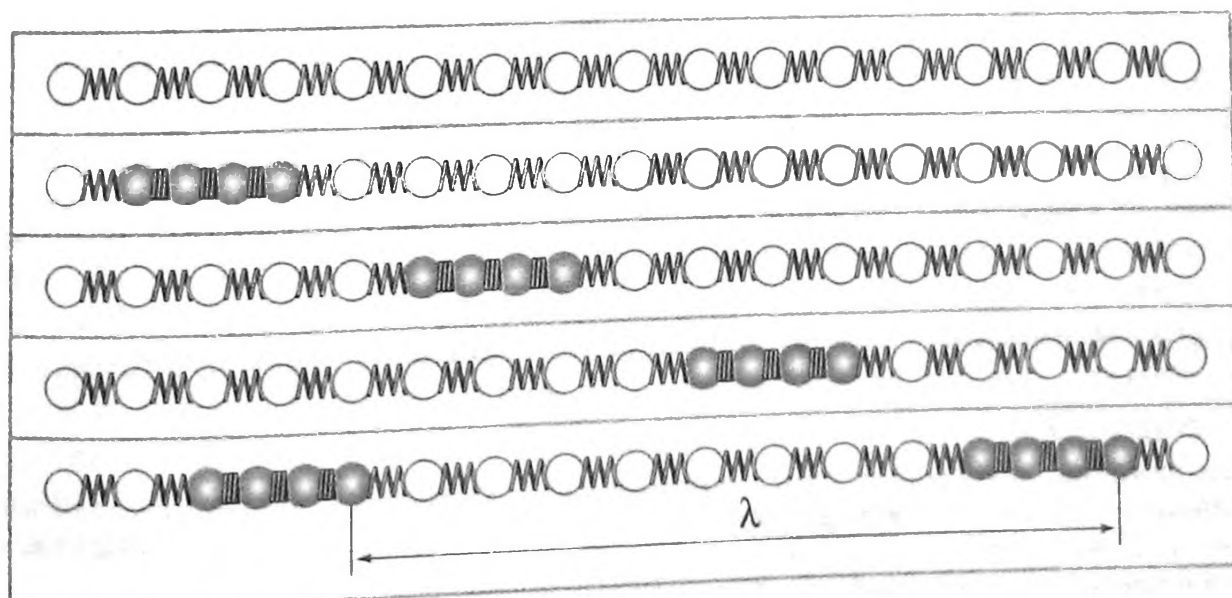


Рис. 42

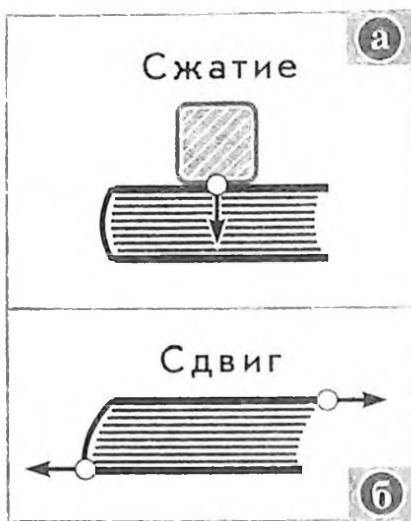


Рис. 43

Вдоль поперечной волны «бегут» горбы и впадины, вдоль продольной — сгущения и разрежения.

Обратим внимание на следующее. Для возникновения волны в среде необходима деформация, без нее не будет силы упругости. Для того чтобы возникла продольная волна, необходима деформация растяжения или сжатия (схематически она показана на рисунке 43, а).

Растягиваться и сжиматься может любая среда — твердая, жидкая и газообразная. Поэтому продольные волны могут возникать и распространяться в любой среде (рис. 44). Для возникновения же поперечной волны требуется деформация другого вида. Это деформация сдвига (рис. 43, б).

А деформация сдвига возможна только в твердых телах. Поэтому поперечные волны могут возникать и распространяться только в твердых средах.

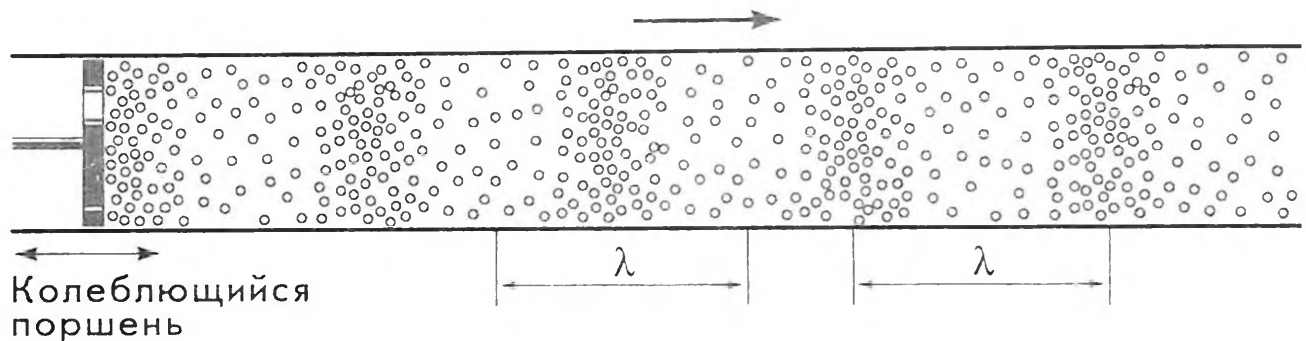


Рис. 44

График волны. График колебаний (см. рис. 33) показывает, как изменяется координата одной колеблющейся точки со временем. В волне колеблются все точки, ее образующие. Поэтому график волны должен показать, как зависит координата всех точек волны от их места в волне. Такой график показан на рисунке 45.

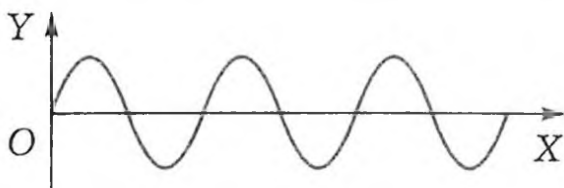


Рис. 45

По оси Y отложены значения отклонения каждой точки от ее положения равновесия, по оси X — расстояние той или иной точки от некоторого начала, например от источника волны. Графики колебаний и волны не следует путать. Хотя они внешне похожи.

Волна и энергия. С колебаниями, как мы знаем, связана энергия, поэтому вместе с колебаниями волной переносится и энергия колебаний, хотя сами носители этой энергии, колеблющиеся частицы, с волной не переносятся. Таким образом, волна оказывается также и переносчиком энергии.

■ УПРАЖНЕНИЕ 7

1. Рыбак заметил, что гребни волн проходят мимо кормы его лодки, стоящей на якоре, через каждые 6 с. Он измерил расстояние между соседними гребнями и нашел, что оно равно 20 м. Какова скорость волны?
2. Волна с частотой колебаний 165 Гц распространяется в среде, в которой скорость волны равна 330 м/с. Чему равна длина волны?

3. Вдоль упругого шнура распространяется **поперечная** волна со скоростью 20 м/с, период колебаний точек шнура 0,5 с. Найдите длину волны.

§ 28 Уравнение бегущей гармонической волны

Реальные тела — это, конечно, не цепочка шариков с пружинками между ними. Но частицы в них реально **существуют**. Силы взаимодействия **между** ними тоже действуют.

Рассмотрим, как образуются волны в реально существующей среде и что они собой представляют.

Любая колебательная система, помещенная в какую-либо среду (например, в воду или в воздух), колеблясь, взаимодействует с частицами, находящимися в прилегающем к системе слое среды.

Если система колеблется по гармоническому закону, тогда вынуждающая сила, с которой она действует на прилегающие к ней частицы среды, заставляя их колебаться, также изменяется по гармоническому закону.

Частицы среды, прилегающие к системе, приходят в колебание одновременно с ней. Но частица, отстоящая от системы на некоторое расстояние x в направлении распространения колебаний, начнет колебаться с опозданием, т. е. когда до нее дойдет распространяющееся в среде возмущение.

Рассмотрим это подробнее. На рисунке 46 изображено распространение гармонического колебания частиц вдоль прямой — оси X . Обозначим смещение точки из положения равновесия через y . Источник колебаний, помещенный в начало координат, в момент времени $t = 0$ начал совершать гармоническое колебание вдоль оси y по закону

$$y_0(t) = A \sin \frac{2\pi}{T} t. \quad (1)$$

Это колебание источника вызовет колебательное движение связанных с ним соседних точек с такими же амплитудой A и периодом T .

Однако последующие точки начнут колебаться с некоторым опозданием, которое тем больше, чем дальше они находятся от источника.

Так, начало колебаний точки K , находящейся на расстоянии x от источника, отстает от начала колебаний источника на промежуток времени $t = \frac{x}{v}$, где v — скорость распространения возмущения в среде. Таким образом, смещение точки K определяется уравнением

$$y_K(t) = A \sin \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{x}{v} \right). \quad (2)$$

Это уравнение называется уравнением бегущей гармонической волны.

Из уравнения (2) следует, что смещение произвольной частицы в распространяющихся колебаниях зависит от двух переменных: *времени t и расстояния x* от источника колебаний.

Если в уравнении (2) раскрыть скобки, то уравнение волны примет вид

$$y_K = A \sin \left(\frac{2\pi t}{T} - \frac{2\pi x}{vT} \right). \quad (3)$$

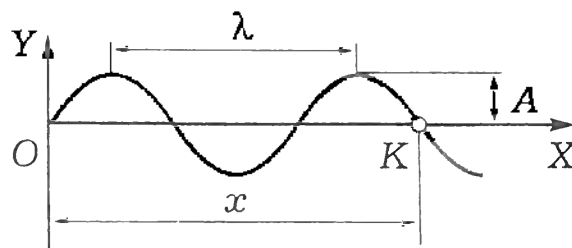


Рис. 46

Из этого уравнения мы можем получить ряд важных выводов. Прежде всего отметим, что если в уравнениях (1) и (2) зафиксировать определенное значение времени t , то смещения точек, отстоящих друг от друга на расстоянии $x = vt$, в один и тот же момент времени t будут одинаковы. Следовательно, распространение колебаний в среде — периодический в пространстве процесс.

Можно также получить вывод о том, что колебания в каждой точке среды — процесс, периодический во времени (если зафиксировать в уравнениях (1) и (2) определенную частицу, отстоящую на x от источника колебания).

Процесс распространения колебаний в сплошной среде, периодический во времени и пространстве, называется *волновым процессом*. Из уравнений также следует, что все точки волны колеблются с одинаковой амплитудой A , одним и тем же периодом T , но с разными фазами. Выражение, стоящее под знаком синуса (косинуса), называется фазой волны. Так, из уравнения (3) следует, что фаза точки K отличается от фазы точки, находящейся в начале координат, на $\frac{2\pi x}{vT}$.

Процесс распространения колебаний в среде. Бегущая волна — это не перемещение частиц среды вслед за волной. Можно проиллюстрировать, что частицы среды лишь совершают колебания около положения равновесия. Если на бегущую по воде волну, например в озере, положить веревку с пробковыми поплавками, отстоящими друг от друга на равных расстояниях, то мы увидим, что поплавки не перемещаются в направлении движения волны. Они лишь совершают колебания, т. е. поднимаются и опускаются в определенной последовательности.

Уравнение волны позволяет строго получить выражение для длины волны, так как по определению длина волны λ — это расстояние между точками, которые в фиксированный момент времени колеблются с разностью фаз $\Delta\varphi = 2\pi$.

Разность фаз между двумя колеблющимися точками, находящимися на расстояниях от источника x_1 и x_2 , в один и тот же момент времени равна: $\Delta\varphi = 2\pi (x_2 - x_1)/Tv$.

Из определения длины волны следует, что при $\Delta\varphi = 2\pi$, $(x_2 - x_1) = \lambda$, $\Rightarrow 2\pi = \frac{2\pi\lambda}{Tv}$, а следовательно, $\lambda = vT$.

Полученное выражение показывает, что за время, равное периоду колебаний T , волна распространяется на расстояние, равное λ . Поэтому часто говорят, что длина волны является пространственным периодом.

Учитывая, что $T = \frac{\lambda}{v}$, можно записать:

$$\lambda = \frac{v}{\nu}, \quad v = \lambda\nu.$$

§ 29 Звуковые волны

Человек живет в мире звуков. Звук — это то, что слышит ухо. Мы слышим голоса людей, пение птиц, звуки музыкальных инструментов, шум леса, гром во время грозы. Звучат работающие машины, движущийся транспорт и т. д.

Что такое звук? Как он возникает? Чем одни звуки отличаются от других?

Раздел физики, в котором изучаются звуковые явления, называется *акустикой*.

Звук — волна. Услышав какой-то звук, мы обычно можем установить, что он дошел до нас от какого-то источника. Рассматривая этот источник, мы всегда найдем в нем что-то колеблющееся. Если, например, звук исходит от репродуктора, то в нем колеблется мембрана — легкий диск, закрепленный по его окружности. Если звук издает музыкальный инструмент, то источник звука — это колеблющаяся струна, колеблющийся столб воздуха и др.

Но как звук доходит до нас? Очевидно, через воздух, который разделяет ухо и источник звука. Но распространяющиеся колебания — это волна. Следовательно, звук распространяется в виде волн. И кое-что о звуковых волнах мы можем сразу сказать. Если звуковая волна распространяется в воздухе, значит — это волна продольная, потому что в газе только такие волны и возможны.

В продольных волнах колебания частиц приводят к тому, что в газе возникают сменяющие друг друга области сгущения и разрежения. На рисунке 44 показана такая волна сгущений и разрежений частиц.

То, что воздух — «проводник» звука, было доказано опытом, поставленным в 1660 г. Р. Бойлем. Если откачать воздух из-под колокола воздушного насоса (рис. 47), то мы не услышим звучания находящегося там электрического звонка.

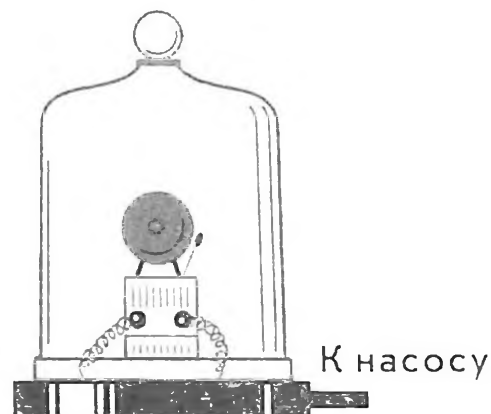


Рис. 47

Звук может распространяться также и в жидкой, и в твердой среде. Тот, кто нырял в реку или море, знает, что под водой хорошо слышны звуки гребных винтов теплоходов, удары камней и др. Звук движущегося поезда хорошо слышен, если приложить ухо к рельсу.

Звуковые частоты. Если звук — это волна, распространяющаяся в воздухе, то он должен возникать всякий раз, когда частицы воздуха приходят в колебательное движение. Размахивание руками, например, тоже должно было бы вызвать звук: ведь машущие руки заставляют частицы колебаться. Известно, однако, что размахивание руками не воспринимается ухом как звук, хотя волна при этом возникает. Объясняется это тем, что ощущение звука создается только при определенных *частотах* колебаний в волне. Опыт показывает, что для органа слуха человека звуковыми являются только такие волны, в которых колебания происходят с частотами от 20 до 20 000 Гц. Размахивать руками 20 и более раз в секунду никто не может!

Звуковая волна характеризуется скоростью распространения колебаний в ней. С длиной волны λ и частотой колебаний ν скорость v связана уже известной нам формулой:

$$v = \lambda \nu.$$

Скорость звука различна в различных средах (веществах). Так, в воздухе при температуре 20 °С скорость звуковых волн (любых длин волн) рав-

на 340 м/с. В других средах она может быть иной. В таблице приведены данные о скорости звука в разных средах.

Частицы жидкости, в которой распространяется звуковая волна, совершают вынужденные колебания с частотой, «навязанной» им колебаниями в источнике звука. Но длина волны даже одного и того же звука в разных средах различна, потому что различны скорости звука.

Вещество	Скорость звука, м/с
Воздух (при 20 °С)	343,1
Водород	1284
Вода (при 20 °С)	1483
Железо	5850
Резина	1800
Морская вода	1530

Самое важное в седьмой главе

Волна — это распространение колебаний в среде. Чтобы колебания могли распространяться, среда должна быть упругой.

Частота колебаний в волне определяется частотой колебаний в источнике. Длина же волны зависит также от скорости распространения волны в данной среде. Скорость волны, частота колебаний и длина волны связаны соотношением

$$v = \lambda \nu.$$

Частным и очень важным случаем волн являются звуковые волны. Звуковые волны доходят до органа слуха человека через воздух. Следовательно, звуковые волны в воздухе — волны продольные.

Человеком воспринимаются как звуки только волны с частотой колебаний в пределах 20—20 000 Гц. Волны с большей частотой колебаний называются ультразвуковыми. Они широко используются в технике для звуколокации, а также для воздействия на вещество.

Заключение

Механика — это обширная наука, представляющая один из важнейших разделов еще более обширной науки — физики. Мы изучили только ее элементы. Многие разделы механики, как, например, вращательное движение твердых тел, остались вне нашего рассмотрения. Некоторые проблемы механики вообще не решены. Тем не менее изученный нами курс дает возможность обрисовать характерные черты этой науки, вернее той ее части, которая называется классической механикой, или механикой Ньютона, потому что в основе ее лежат законы Ньютона. Мы видели, что эти законы выражены в виде математических соотношений между рядом величин (импульсом, ускорением, массой, силой и др.). Сами же значения этих величин получены в результате измерений при помощи приборов. Как бы хитроумно ни бы-

ли устроены эти приборы, измерения выполняются с некоторой погрешностью. Возникает вопрос: в какой мере законы Ньютона точны?

До конца прошлого столетия никто не сомневался в абсолютной правильности этих законов. И действительно, законы Ньютона были установлены в период, когда люди начали широко использовать различные машины и аппараты. И по сей день по законам Ньютона рассчитывают конструкции сложнейших машин и механизмов — от многотонных турбин и ракет до точнейших приборов, массы которых не превышают долей грамма. И не было случая, чтобы законы Ньютона давали «осечку». В этом огромное практическое значение этих законов.

И тем не менее в XX в. выяснилось, что законы Ньютона все-таки не абсолютно точны. Ими нельзя пользоваться, когда тела движутся с очень большими скоростями, которые сравнимы со скоростью света. Эйнштейн, которого называют Ньютоном XX в., сумел сформулировать более общие законы движения, справедливые и для движения со скоростями, близкими к скорости света. Эти законы лежат в основе так называемой релятивистской механики или теории относительности. А законы Ньютона представляют собой следствие этих законов, когда скорости тел малы по сравнению со скоростью света.

Законы Ньютона «отказывают» и при рассмотрении движения внутриатомных частиц. Для таких движений существует свой «свод» законов, который называется квантовой механикой и из которого классическая механика тоже получается как частный случай. Замечательно, что законы сохранения импульса и энергии, выведенные из законов Ньютона, справедливы и в квантовой механике, и в теории относительности.

Мы видим, что механика лежит в основе всего естествознания. Мы изучили небольшую часть только классической механики. Но этой частью нам придется пользоваться на протяжении всего курса физики.

Молекулярная физика

Введение

Молекулярная физика — раздел физической науки, в котором изучаются строение и свойства вещества.

В основе молекулярной физики лежит утверждение: любое вещество, любое тело состоит из беспорядочно движущихся, взаимодействующих между собой частиц — молекул, атомов или ионов. Из курса химии вы знаете, в чем состоит различие между атомами и молекулами. Здесь мы будем называть частицы, из которых состоит вещество, *молекулами* даже в тех случаях, когда то или иное вещество состоит из атомов.

Молекулы настолько малы, что непосредственно увидеть их и тем самым убедиться в их реальном существовании нельзя. Но давно известны такие свойства тел, которые нельзя объяснить, если считать тела такими, какими они нам кажутся, т. е. сплошными. С одним из таких свойств — способностью тел деформироваться — вы познакомились в курсе физики IX класса. Ясно, что деформация твердого тела связана с тем, что изменяются расстояния между частицами (молекулами), из которых тело состоит. При деформации, как известно, возникают силы упругости. Это означает, что между молекулами действуют силы притяжения или отталкивания.

Если вещество состоит из молекул, то свойства вещества и явления, которые могут в нем происходить, зависят от того, каковы эти молекулы, как они движутся, как взаимодействуют. Поэтому основная задача молекулярной физики состоит в том, чтобы, исходя из факта молекулярного строения вещества, объяснить эти свойства и явления. Это позволит заранее знать, как будут вести себя вещества в тех или иных условиях, при различных воздействиях на них.

Мы начнем с того, что познакомимся с главными «действующими лицами» молекулярной физики — молекулами.

глава

8

Основные сведения о молекулах

Гипотеза, подтвержденная опытом

Еще в начале XX в. предположение (гипотеза) о том, что все тела состоят из молекул и атомов, поддерживалось далеко не всеми. Многие философы и некоторые физики и химики отрицали

реальное существование атомов и считали безнадежными попытки объяснить свойства вещества движением и взаимодействием частиц. Известный химик В. Оствальд, например, в лекции, прочитанной в 1901 г., сделал такое заявление: «Атомной теории следовало бы уже давно истлеть в пыли библиотек».

Физики, сторонники молекулярной гипотезы, несмотря на нападки ее противников, старались доказать реальность молекул. И несмотря на то, что молекулы нельзя увидеть, уже в первое десятилетие XX в. удалось не только доказать реальность молекул и их движений, но и определить значения основных величин, относящихся к молекулам: их массы, размеры, скорости движений, а также «сосчитать» молекулы, найти их число в любом теле.

§ 30 Движение молекул

Целый ряд хорошо известных фактов свидетельствует о том, что молекулы вещества непрерывно движутся. На это указывают, например, такие явления, как перемешивание жидкостей и газов, распространение запахов. Ведь при этом молекулы одного вещества проникают в другое. А для этого молекулы должны двигаться. Напомним, что такое проникновение одного вещества в другое называется *диффузией*.

Особенно наглядно движение молекул обнаруживается в *броуновском движении*. Так было названо явление, открытое в 1827 г. английским ботаником Робертом Броуном.

Броун рассматривал под микроскопом очень маленькую каплю жидкости со взвешенной в ней пылью растений. В капле оказалось много «взвешенных»¹ частиц.

К удивлению Броуна, частицы эти не просто «висели» в жидкости, а непрерывно двигались, постоянно изменяя направление движения, словно исполняя какой-то причудливый танец. Путь каждой частицы — это сложный зигзаг, подобный показанному на рисунке 48. Здесь точками отмечены положения одной из частиц через каждые 30 с. Тонкие прямые стрелки — это векторы перемещения частицы за 30 с. Именно векторы перемещения, а не траектории. Цветная стрелка — это вектор перемещения частицы за все время наблюдения. Если бы положение частицы отмечалось не через 30 с, а, например, через 1 с, то каждый отрезок сам превратился бы в ломаную линию. Движения частиц можно наблюдать месяцами, годами. Это вечные движения.

Долгое время хаотические движения броуновских частиц оставались загадочными. Лишь в 70-х годах XIX в. было высказано предположение о

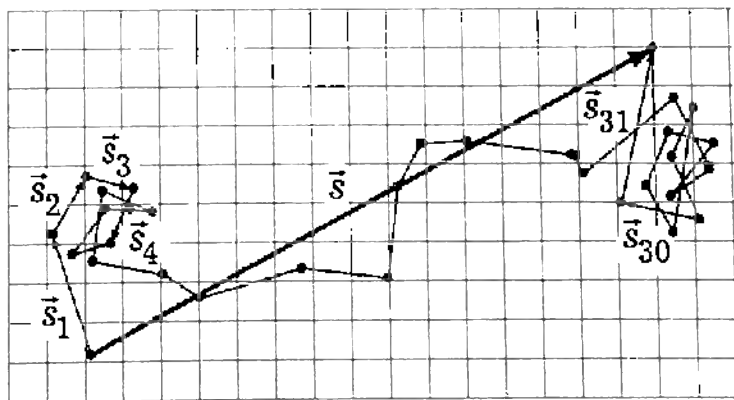
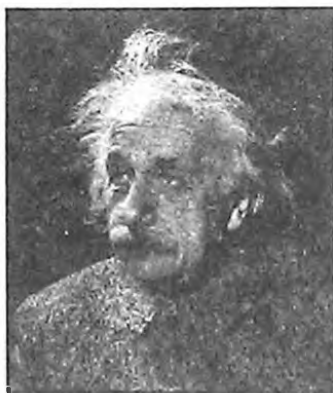


Рис. 48

¹ «Взвешенные» частицы — это частицы, распределенные по объему жидкости, не оседающие на дно и не всплывающие на поверхность жидкости.



Эйнштейн
Альберт
(1879—1955)

том, что причина этих движений — удары молекул жидкости, окружающей частицы. А беспорядочны движения частиц потому, что и движения молекул тоже беспорядочны. При очень большом числе ударяющихся молекул случайно может оказаться, что число ударов молекул о частицу с одной стороны больше, чем с другой. Так как броуновская частица очень мала (ее размеры около 10^{-7} м), то эта неодинаковость числа ударов с разных сторон приводит к смещению частицы. А так как большее число ударов может прийти то на одну сторону частицы, то на другую, то броуновские частицы и совершают те беспорядочные движения, которые так удивляли Броуна и других исследователей.



Перрен
Жан Батист
(1870—1942)

Исходя из этого предположения, Альберт Эйнштейн в 1905 г. теоретически решил задачу о движении броуновской частицы. Пользуясь законами механики, он показал, что квадрат перемещения частицы (s^2) пропорционален интервалу времени, в течение которого это перемещение совершается. Теория Эйнштейна объясняла также зависимость интенсивности броуновского движения от температуры. А французский физик Жан Перрен, проведя множество опытов с броуновскими частицами, полностью подтвердил теорию Эйнштейна. Такое совпадение результатов опытов с теорией показало, что молекулы в самом деле существуют и что они действительно хаотически движутся. Сомнения в реальности хаотически движущихся молекул исчезли даже у самых упорных противников молекулярной гипотезы. Гипотеза стала теорией.

■ ВОПРОСЫ

1. Какие факты свидетельствуют о молекулярном строении тел? 2. В чем состоит явление, называемое броуновским движением? 3. Какие факты свидетельствуют о том, что молекулы непрерывно движутся? 4. В чем причина непрерывных беспорядочных движений броуновских частиц?

§ 31 Масса молекул

Измерить массу молекулы обычным путем, т. е. взвешиванием, конечно, невозможно. Она для этого слишком мала. И все-таки масса молекулы была измерена. Сделал это тоже Жан Перрен. Ему удалось сравнить массу молекулы с массой броуновской частицы. А массу броуновской частицы определить уже не так трудно, хотя и она очень мала и взвесить ее тоже нельзя.

О воздушной атмосфере Земли. Расскажем, как это сравнение масс броуновской частицы и молекулы было сделано. Известно, что плотность атмосферного воздуха уменьшается с увеличением высоты над поверхностью Земли. Летчики, альпинисты, географы пользуются этим свойством для измерения высоты.

Напомним сначала, что плотностью ρ вещества называется отношение массы m вещества к его объему V : $\rho = \frac{m}{V}$. С другой стороны, масса вещества равна произведению числа молекул на массу одной молекулы, т. е. $m = Nm_0$, где N — число молекул в куске вещества и m_0 — масса одной молекулы. Отсюда плотность $\rho = \frac{N}{V} m_0$. Отношение $\frac{N}{V}$, равное числу молекул в единице объема, называют *концентрацией*. Концентрацию обозначают буквой n . Тогда для плотности получим:

$$\rho = nm_0.$$

Молекулы воздуха, обладая массой, должны были бы под действием силы тяжести упасть на Землю. Но этому мешает хаотическое движение молекул, которое стремится рассеять молекулы по всему безграничному пространству. Совместное действие этих двух факторов и приводит к тому, что около Земли существует атмосфера, простирающаяся на сотни километров над ее поверхностью.

Но плотность воздуха ρ , а значит, и число молекул в единице объема n , с высотой убывает. Это относится не только к воздуху в целом, но и к каждому из газов, его составляющих (азот, кислород, аргон). Результаты измерений показали, например, что число частиц в единице объема для кислорода в атмосфере уменьшается с высотой так, как это показано на рисунке 49. На этом рисунке по оси ординат отложено отношение $\frac{n}{n_0}$, где n — число частиц кислорода в единице объема на высоте H и n_0 — число этих же частиц у поверхности Земли. При $H = 0$ (у поверхности Земли) $n = n_0$ и $\frac{n}{n_0} = 1$.

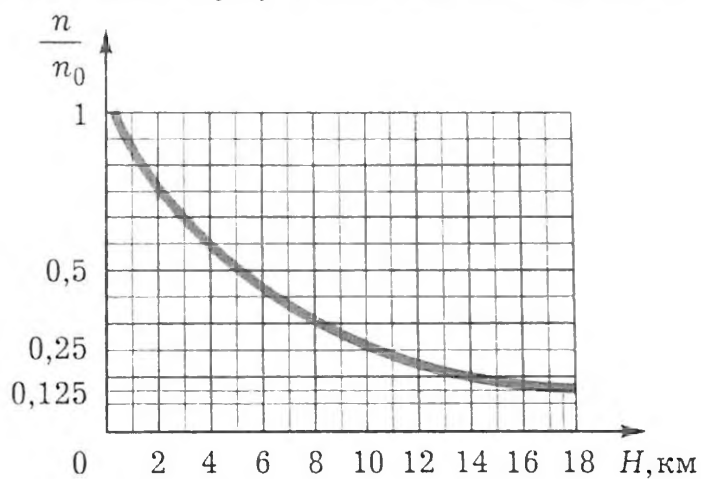


Рис. 49

Из графика видно, что на высоте 5 км число молекул в единице объема вдвое меньше, чем у поверхности Земли. При подъеме еще на 5 км n уменьшается еще в 2 раза и т. д. Можно показать, что такая же закономерность должна наблюдаться для любых хаотически движущихся частиц, на которые действует сила тяжести. В частности, она должна наблюдаться и для броуновских частиц. Они ведь тоже движутся хаотически и также подвержены действию силы тяжести.

«Атмосфера» броуновских частиц. Перрен подтвердил этот вывод опытами. Броуновскими частицами в его опытах служили маленькие шарики особой смолы — гуммигута, взвешенные в воде. Каплю такой взвеси (1 на рисунке 50) Перрен помещал в стеклянную кювету 2 глубиной всего 0,1 мм. Кювета закрывалась тонким стеклом 3. С помощью микроскопа 4

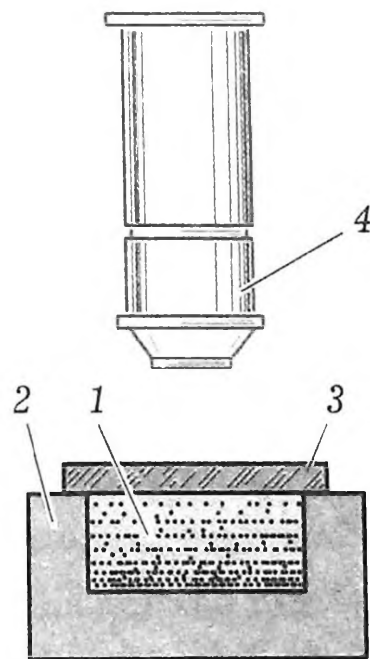


Рис. 50

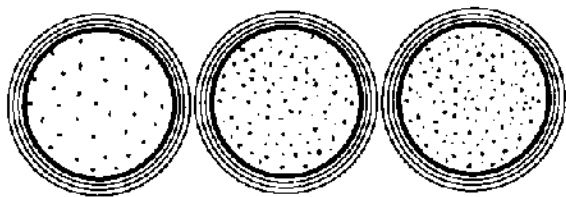


Рис. 51

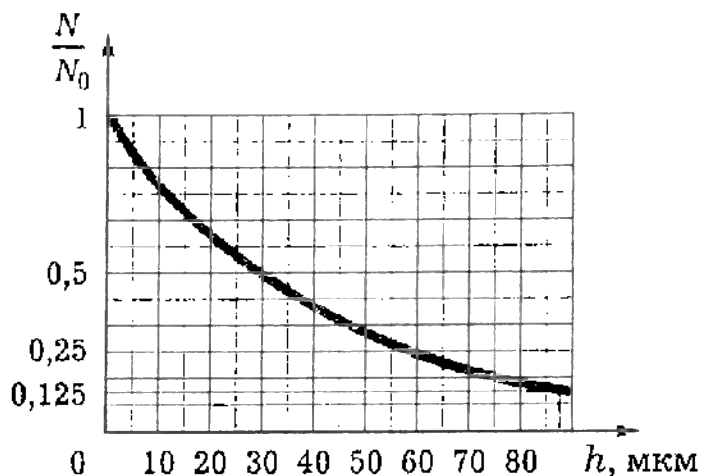


Рис. 52

можно было наблюдать за происходящим в кювете. В поле зрения микроскопа видно было сравнительно мало частиц, так что их было легко сосчитать. Броуновские частицы совершали, конечно, беспорядочные движения, но теперь Перрен интересовали не движения частиц, а их число в поле зрения микроскопа. Перемещая тубус (трубу) микроскопа, Перрен фокусировал его на разных глубинах кюветы и на каждой из них подсчитывал число частиц, видимых в поле зрения (рис. 51). Таким образом была получена зависимость числа частиц от высоты h над дном кюветы. Эта зависимость графически представлена на рисунке 52; N_0 и N соответственно число частиц у дна кюветы и на высоте h над ним. Кривая на этом рисунке имеет такой же вид, что и кривая на рисунке 49. Броу-

новские частицы в кювете образуют как бы атмосферу в миниатюре. Разница только в том, что в воздушной атмосфере число n изменяется вдвое при изменении высоты H на 5 км, а в «атмосфере» броуновских частиц число N изменяется вдвое при изменении h всего на 30 мкм ($3 \cdot 10^{-5}$ м). Значит,

$$\frac{H}{h} = \frac{5000 \text{ м}}{3 \cdot 10^{-5} \text{ м}} = 1,67 \cdot 10^8.$$

Чем же объясняется такая огромная разница? Оказывается, она связана с различием масс молекул кислорода и броуновской частицы.

Перрен проводил опыты с частицами гуммигута различных размеров и масс и установил, что изменение высоты h , при котором число частиц в поле зрения уменьшается вдвое, обратно пропорционально массе частицы. Если обозначить массы частиц через m_1 и m_2 , а высоты, на которых их число уменьшается вдвое, через h_1 и h_2 , то

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{m_2}{m_1}.$$

Это должно быть справедливо для любых хаотически движущихся частиц, на которые действует сила тяжести, будь то молекулы газа или броуновские частицы. Поэтому, обозначив массу молекулы кислорода через m_{O_2} , а массу броуновской частицы через $m_{бр}$, можно записать:

$$\frac{m_{бр}}{m_{O_2}} = \frac{H}{h}.$$

Но, как мы видели, $\frac{H}{h} = 1,67 \cdot 10^8$. Значит, и $\frac{m_{бр}}{m_{O_2}} = 1,67 \cdot 10^8$, т. е. масса броуновской частицы почти в 200 миллионов раз больше массы молекулы кислорода!

В опыте, которому соответствует кривая рисунка 52, масса частиц гум-мюгута была равна $8,5 \cdot 10^{-18}$ кг. Следовательно, масса молекулы кислоро-да равна

$$m_{\text{O}_2} = \frac{8,5 \cdot 10^{-18} \text{ кг}}{1,67 \cdot 10^8} = 5,1 \cdot 10^{-26} \text{ кг.}$$

Современное, более точное значение массы молекулы кислорода — $5,31 \cdot 10^{-26}$ кг.

Так была определена масса молекулы одного из веществ — кислорода. Этого, как мы увидим, достаточно, чтобы определить массу любой другой частицы (молекулы, атома).

Относительная масса атомов и молекул. До опыта Перрена значения масс атомов и молекул не были известны. Но химики сумели выяснить, во сколько раз масса атома любого химического элемента больше массы ато-ма самого легкого из элементов — водорода. Так, например, было извест-но, что масса атома кислорода больше массы атома водорода в 16 раз, мас-са атома азота — в 14 раз, углерода — в 12 раз и т. д. Масса атома водоро-да служила как бы единицей массы для атомов, или, как говорят, *атомной единицей массы*¹ (а. е. м.). Молекулы состоят из атомов, так что масса молекулы равна сумме масс образующих ее атомов. Поэтому, напри-мер, масса молекулы кислорода (O_2) в 32 раза больше, чем 1 а. е. м., азо-та (N_2) в 28 раз, углекислого газа (CO_2) в 44 раза и т. д.

Число, показывающее, во сколько раз масса атома больше атомной еди-ницы массы, называется *относительной атомной массой* данного элемен-та, а число, показывающее, во сколько раз масса молекулы больше атом-ной единицы массы, называется *относительной молекулярной массой* данного вещества. Поскольку мы условились любые частицы, из которых состоит вещество, называть молекулами, мы будем обе эти величины обо-значать одинаково — M_r . Таким образом, значения M_r выражают массу атомов и молекул в атомных единицах массы, а не в обычных единицах массы — килограммах. Чтобы узнать массу частицы в килограммах, нуж-но знать значение атомной единицы в килограммах. Опыты Перрена и по-зволили узнать это.

Чему равна 1 а. е. м.? Масса молекулы кислорода равна $5,31 \cdot 10^{-26}$ кг. Но она в 32 раза больше атомной единицы массы, т. е. равна 32 а. е. м. От-сюда мы сразу получаем, что $1 \text{ а. е. м.} = \frac{5,31 \cdot 10^{-26} \text{ кг}}{32} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$

Как вычислить массу любой молекулы или атома? Зная значение 1 а. е. м., легко найти и массу (в килограммах) любой молекулы. Для это-го нужно умножить M_r на полученное значение 1 а. е. м.

Обозначим массу молекулы m_0 , тогда

$$m_0 = 1,66 \cdot 10^{-27} \cdot M_r \text{ кг,}$$

где M_r — относительная молекулярная масса вещества.

Относительные молекулярные массы для химических элементов указа-ны в периодической таблице элементов Менделеева. При этом нужно иметь в виду, что значения, приведенные в таблице, несколько отлича-ются от целых чисел, например у кислорода — 15,9994, а не 16, у азо-

¹ В настоящее время за единицу атомной массы принимают 1/12 массы атома угле-рода, что практически совпадает с массой атома водорода.

та — 14,0067, а не 14, у водорода — 1,0079, а не 1 и т. д. Это связано с тем, что атомы одного и того же химического элемента могут иметь различные массы (изотопы). Для практических расчетов мы будем пользоваться значениями целых чисел, ближайших к приведенным в таблице, и считать, что относительная молекулярная масса водорода — 1, кислорода (атомная) — 16, железа — 56 и т. д.

■ ВОПРОСЫ

1. Почему броуновские частицы должны вести себя так же, как молекулы воздуха в атмосфере? 2. Что такое атомная единица массы? Чему она равна? 3. Что такое относительная атомная масса элемента? 4. Что такое относительная молекулярная масса вещества? 5. Как вычисляется масса молекулы любого вещества? 6. Масса какой молекулы больше — аммиака (NH_3) или азотной кислоты (HNO_3)?

■ УПРАЖНЕНИЕ 8

1. Найдите относительные молекулярные массы молекул озона (O_3), соляной кислоты (HCl), серной кислоты (H_2SO_4).
2. Вычислите массы молекул веществ, перечисленных в задаче 1.
3. Относительную молекулярную массу гуммигута — материала, из которого состояли броуновские частицы в опытах Перрена, можно считать равной 320. Чему равна масса молекулы гуммигута?

§ 32 Число молекул — количество вещества

Если масса молекулы какого-нибудь вещества известна, то легко узнать, сколько молекул N содержится в любом теле, состоящем из этого вещества. Для этого надо массу m тела (ее измеряют с помощью весов) разделить на массу m_0 одной молекулы: $N = \frac{m}{m_0}$. Но масса одной молекулы $m_0 = 1,66 \cdot 10^{-27} \cdot M_r$ кг. Следовательно,

$$N = \frac{m}{1,66 \cdot 10^{-27} \cdot M_r \text{ кг}} = 6,02 \cdot 10^{26} \frac{m}{M_r \text{ кг}}. \quad (1)$$

Как видно из этого выражения, число молекул в любом теле необычайно велико. Например, в капле воды массой около $4 \cdot 10^{-9}$ кг (четыре миллиардные доли килограмма!) содержится $N = 3,3 \cdot 10^{16}$ молекул. В обычной записи $N = 33\,000\,000\,000\,000\,000$ — 33 миллиона миллиардов молекул.

Количество вещества. Число молекул в каком-нибудь теле определяет количество вещества в нем. Количество вещества — это величина, равная числу молекул этого вещества. Если, например, взять кусок железа и кусок алюминия с одинаковым числом молекул в обоих кусках, то количество вещества в обоих кусках будет одинаковым, хотя по объему и по массе эти куски будут существенно отличаться друг от друга.

Единица количества вещества — моль. За единицу количества вещества естественно принять просто молекулу. Но тогда эта величина будет выражаться очень большими числами. Более удобную единицу можно выбрать на основании формулы (1). Из формулы следует, что если взять любое тело, масса m которого численно равна относительной молекулярной массе вещества этого тела, то отношение $\frac{m}{M_r}$ численно равно 1 и число частиц в теле из любого вещества будет равно $6,02 \cdot 10^{26}$. Это число частиц и

могло бы служить единицей количества вещества. Условились, однако, принять за единицу количества вещества величину, в 1000 раз меньшую, т. е. не $6,02 \cdot 10^{26}$, а $6,02 \cdot 10^{23}$. За единицу количества вещества принимается такое количество вещества, в котором содержится $6,02 \cdot 10^{23}$ частиц (молекул, атомов и др.). Называется эта единица моль (сокращенного обозначения эта единица не имеет).

Число молекул в одном моле вещества называется *постоянной Авогадро* в честь итальянского химика Амедео Авогадро (1776—1856) и обозначается N_A :

$$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}.$$

Молярная масса. Итак, 1 моль любого вещества содержит одно и то же число частиц — N_A частиц. А какова масса 1 моль вещества? Ясно, что поскольку массы молекул различных веществ различны, то и масса N_A частиц, т. е. масса моля, у различных веществ различна. Как найти массу 1 моль, или, как говорят, *молярную массу* того или иного вещества?

Мы видели (см. формулу (1)), что если масса какого-то тела m равна M_r кг, то в таком теле содержится $6,02 \cdot 10^{26}$ молекул. Но число частиц в 1 моль в 1000 раз меньше. Значит, и масса 1 моль в 1000 раз меньше, чем M_r . Если обозначить молярную массу вещества буквой M , то $M = M_r \text{ кг}/1000 = 10^{-3} \cdot M_r \text{ кг}$. Единицей молярной массы служит 1 кг/моль. Например, молярная масса кислорода O_2 ($M_r = 32$) равна 0,032 кг/моль, углекислого газа ($M_r = 44$) — 0,044 кг/моль и т. д. Но в 32 г кислорода, в 44 г углекислого газа, в 18 г воды число молекул одно и то же и равно постоянной Авогадро.

Число молекул и число молей. Количество вещества в теле — это число молекул в нем. Но единицей количества вещества служит 1 моль (в котором N_A частиц), так что количество вещества ν в теле задается числом молей в нем. Очевидно, что $N = \nu N_A$. Можно, например, сказать, что в школе учится 100 десятиклассников, но можно сказать и так: в школе 4 десятых класса (считая, что в каждом классе 25 учеников).

Число молей ν легко найти, если известна масса тела. Поскольку молярная масса M — это масса одного моля, то $\nu = \frac{m}{M}$. Тогда число N молекул выражается простой формулой

$$N = \frac{m}{M} N_A.$$

■ ВОПРОСЫ

1. Что такое количество вещества? В каких единицах оно выражается?
2. Чему равна масса одного моля вещества? Что такое молярная масса?
3. Что такое постоянная Авогадро?
4. Как найти число молей вещества в теле, если известна его масса?
5. Как найти число молей вещества в теле, если известно число частиц в нем?

■ ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Какое количество вещества содержится в одном стакане воды? Масса воды в стакане равна 0,2 кг. Чему равно число молекул воды в этом стакане?

Решение. Относительная молекулярная масса воды равна 18. Значит, молярная масса воды $M = 0,018 \text{ кг/моль}$. Количество воды, выраженное в молях,

$$\nu = \frac{m}{M} = \frac{0,2 \text{ кг}}{0,018 \text{ кг/моль}} = 11,1 \text{ моль}.$$

Число молекул

$$N = \nu N_A = 11,1 \text{ моль} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{моль}} = 6,68 \cdot 10^{24}.$$

■ УПРАЖНЕНИЕ 9

1. Сколько молекул содержалось в броуновской частице в опыте Перрена, если масса частицы была равна $8,5 \cdot 10^{-18}$ кг, а относительная молекулярная масса гуммигута равна 320?
2. Какое количество вещества содержится в углекислом газе массой 1 кг?
3. Какое количество вещества содержится в одноатомном водороде массой 1 г? в двухатомном водороде массой 2 г?
4. Сколько молекул содержится в воздухе массой 1 кг, если считать, что воздух состоит из кислорода (22%) и азота (78%)? Молекулы этих газов двухатомные.
5. Кусок алюминия и кусок железа содержат одинаковое количество вещества. Какова масса куска алюминия, если масса куска железа 2 кг?

§ 33 Размеры молекул

Мы сумели «взвесить» молекулы. Оказалось, что масса одной молекулы невообразимо мала. Масса молекулы кислорода, например, выражается такой дробью:

$$m_{\text{O}_2} = \frac{5,31}{1\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000}.$$

Мы смогли также «сосчитать» молекулы. Их оказалось в любом теле чрезвычайно много. Теперь выясним, каковы размеры молекул. Измерить размеры молекул какой-нибудь линейкой так же невозможно, как нельзя измерить их массу с помощью весов.

Тем не менее существует много способов определения размеров молекул, и все они дают согласованные результаты. Мы приведем здесь самый простой, хотя и не самый точный способ. Он основан на том, что в твердых и жидких телах молекулы расположены очень близко одна к другой, почти вплотную. Тогда можно считать, что объем, который занимает тело, имеющее некоторую массу m , приблизительно равен сумме объемов всех его молекул. Если объем тела равен V , а число молекул в нем равно N , то объем одной молекулы равен $\frac{V}{N}$. Но число молекул N , как мы видели в предыдущем параграфе, равно $\frac{m}{M} N_A$, где M — молярная масса вещества и N_A — постоянная Авогадро. Следовательно, объем одной молекулы равен $\frac{VM}{mN_A}$.

Отношение $\frac{V}{m}$ — это величина, обратная плотности вещества ρ , так что $\frac{V}{m} = \frac{1}{\rho}$. Значит, можно написать, что объем одной молекулы равен $\frac{M}{\rho N_A}$.

Мы, конечно, не знаем, какова форма молекулы. Но мы не сделаем большой ошибки, если примем, что молекула — это маленький шарик. А из геометрии известно, что объем шара равен $\frac{4}{3} \pi r^3$, где r — его радиус. Следовательно,

$$\frac{4}{3} \pi r^3 = \frac{M}{\rho N_A}.$$

Отсюда

$$r = \sqrt[3]{\frac{3M}{4\pi\rho N_A}}.$$

Вычислим, например, радиус молекулы воды. Молярная масса M воды равна $0,018$ кг/моль, а плотность ρ воды равна $1 \cdot 10^3$ кг/м³. Для радиуса молекулы воды получаем:

$$r = \sqrt[3]{\frac{18 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}}{4,2 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{моль}}}} = 1,9 \cdot 10^{-10} \text{ м}.$$

Так же можно вычислить и радиус молекулы любого вещества.

Размеры молекул различных веществ неодинаковы, но все они обычно порядка 10^{-10} м, т. е. очень малы. Настолько малы, что непосредственно увидеть молекулы сложно даже с помощью наилучших оптических микроскопов. В настоящее время отдельные молекулы можно увидеть с помощью электронного микроскопа.

■ УПРАЖНЕНИЕ 10

1. Сколько понадобилось бы молекул воды, чтобы выстроить их в «шеренгу» длиной 1 см?
2. Вычислите радиус молекулы (атома) меди. Плотность меди 8900 кг/м³.
3. Какой объем приходится на долю каждой молекулы органического стекла (плексигласа)? Относительная молекулярная масса равна $2 \cdot 10^6$. Плотность плексигласа 1180 кг/м³.
4. Сколько молекул воды содержится в 1 мм^3 воды?

§ 34 Взаимодействие молекул.

Твердые тела, жидкости и газы

Броуновское движение убедительно доказывает, что молекулы в любом теле движутся непрерывно и беспорядочно. Но если это так, то почему молекулы не разлетаются по всем направлениям? Почему твердые и жидкие тела имеют определенный и постоянный объем? Ответ может быть только один: молекулы взаимодействуют друг с другом, между ними действуют силы. Что это за силы?

Молекулы притягиваются друг к другу. Из курса физики IX класса вы узнали, что при растяжении стержня возникает сила упругости. Она направлена так, что если после растяжения предоставить стержень самому себе, то он вернется к прежнему состоянию. При растяжении тела его молекулы удаляются одна от другой. И если они возвращаются на прежние места, то это значит, что между ними действуют *силы притяжения*.

Молекулы отталкиваются друг от друга. Сила упругости возникает не только при растяжении тела, но и при его сжатии. Если после сжатия предоставить тело самому себе, то оно тоже восстанавливает свое исходное состояние. А это значит, что молекулы отталкиваются одна от другой, между ними действуют *силы отталкивания*.

Силы зависят от расстояния. Мы видим, что силы взаимодействия между молекулами зависят от расстояния между ними. И мы можем сделать такой вывод об этих силах: есть такое расстояние r_0 между молекулами, при котором сила взаимодействия между ними равна нулю (рис. 53, а). Именно на таком расстоянии и расположены друг от друга мо-

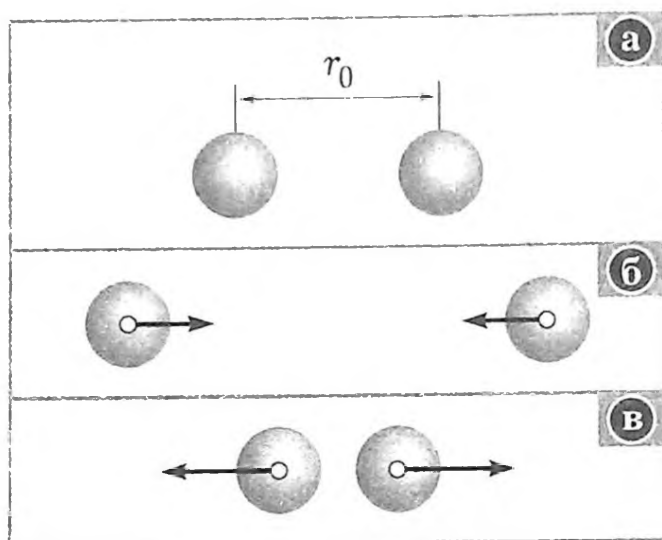


Рис. 53

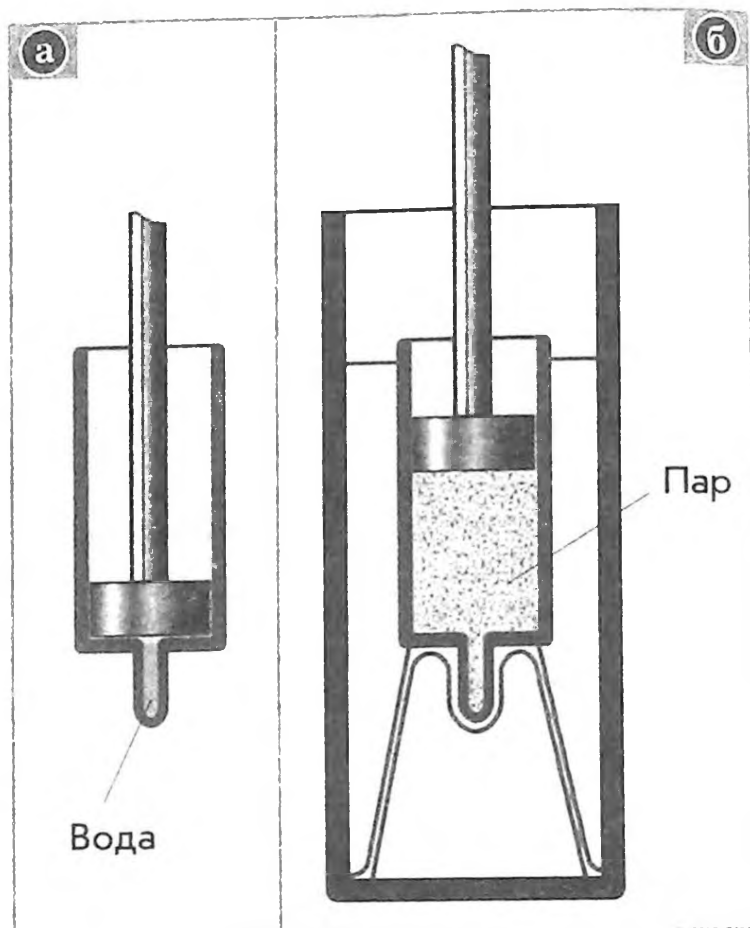


Рис. 54

лекулы, когда тело не деформировано. Если расстояние между молекулами больше, чем r_0 (тело растянуто), молекулы *притягиваются* друг к другу (рис. 53, б). Если межмолекулярное расстояние меньше, чем r_0 , между молекулами действует *сила отталкивания* (рис. 53, в).

В жидкостях и твердых телах, в которых молекулы удалены одна от другой на очень малые расстояния (которые приблизительно равны размерам молекул), силы взаимодействия достаточно велики, чтобы молекулы не могли разлететься. Поэтому твердые тела и жидкости сохраняют свой объем.

Газ. Кроме жидкостей и твердых тел существуют еще и газы. У газа нет, так сказать, собственного объема. Объем газа — это всегда объем сосуда, в котором он заключен, как бы велик ни был сосуд¹. Это объясняется тем, что в газе силы притяжения настолько малы, что они не могут мешать молекулам разлетаться, и он занимает весь предоставленный ему объем. А малы эти силы потому, что расстояния между молекулами в газе много больше, чем в жидкостях и твердых телах. В этом можно убедиться опытным путем, хотя в классе опыт сделать трудно.

Цилиндрический сосуд вместимостью около 2 л имеет внизу маленький отросток объемом 1 см³. Отросток заполнен водой и закрыт легким поршнем (рис. 54, а), который может с малым трением скользить вдоль стенок широкой части сосуда, плотно соприкасаясь с ними.

¹ Воздух, окружающий Землю, — атмосфера — не заключен в сосуд, и «предоставленный» ему объем — это вся Вселенная. Но он удерживается у поверхности Земли силой тяжести.

Если поместить этот сосуд в другой, с кипящим водным раствором соли (рис. 54, б), то мы увидим, что поршень поднимется на такую высоту, что объем под ним будет равен примерно 1600 см^3 . Это вода в отрывке превратилась в газ (водяной пар), газ поднял поршень (см. рис. 54, б), и объем, занятый молекулами пара, увеличился в **1600 раз**. А это значит, что среднее расстояние между молекулами увеличилось в $\sqrt[3]{1600}$ раз, т. е. приблизительно в 12 раз (рис. 55). Силы же притяжения между молекулами так быстро уменьшаются с ростом расстояния между ними, что при таком увеличении расстояния они уменьшаются в десятки миллионов раз и уже не могут помешать молекулам разлетаться.



Рис. 55

Идеальный газ. В газе силы взаимодействия между молекулами очень малы. Настолько малы, что во многих случаях ими можно пренебречь и считать, что молекулы газа не взаимодействуют друг с другом.

Газ, состоящий из не взаимодействующих между собой молекул, называется идеальным газом. При определенных условиях и «настоящие», реальные газы ведут себя как идеальные. Атмосферный воздух при нормальных условиях с большой степенью точности может считаться идеальным газом. Такой газ мы прежде всего и изучим.

Столкновения газовых молекул. Хотя мы и считаем, что молекулы идеального газа не взаимодействуют, но это не значит, что каждая молекула в газе совершенно свободна от влияния других молекул. Дело в том, что, непрерывно двигаясь, молекулы неизбежно сталкиваются друг с другом. Но при столкновении молекулы оказываются на предельно малом расстоянии одна от другой. А при малых расстояниях, как мы знаем, между молекулами действуют большие силы отталкивания. Они заставляют каждую из них изменить свой импульс, а значит, и скорость — изменить ее модуль или направление. Таким образом, молекулы все-таки взаимодействуют между собой, но только в момент столкновения. Подавляющую часть времени молекулы движутся, не взаимодействуя. Поэтому и можно считать, что идеальный газ состоит из невзаимодействующих молекул.

Столкновения молекул со стенкой сосуда. Давление газа. Беспорядочно двигаясь, молекулы попадают и на стенки сосуда, в котором находится газ. Но стенки сосуда тоже состоят из молекул, так что удары молекул о стенку — это столкновения между молекулами. А при этом, как мы видели, действуют силы отталкивания. Это значит, что «бомбардировка» стенок сосуда молекулами газа приводит к тому, что стенка действует на газ с некоторой силой. А газ с такой же по модулю силой действует на стенку (третий закон Ньютона). Из-за этого газ в любом сосуде всегда сжат, и он подобен сжатой пружине: сжатая пружина всегда готова разжаться, а газ — расшириться.

Характеристикой действия газа на стенку сосуда служит не сила, с которой он действует на стенку, а *давление*. Напомним, что давлением называется отношение модуля силы, действующей на поверхность, перпендику-

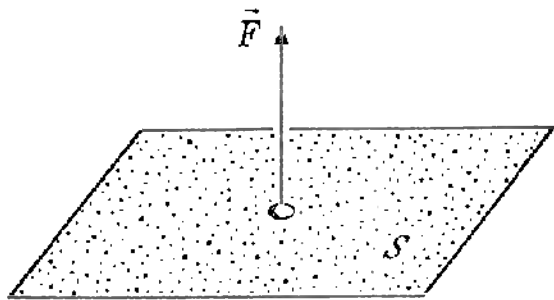


Рис. 56

одинакова. Одинаково поэтому и давление. Об этом говорится в известном законе Паскаля, справедливом не только для жидкости, но и для газа. Закон Паскаля — прямое следствие хаотичности движений молекул.

Единица давления. Из формулы $p = \frac{F}{S}$ следует, что в СИ единица давления — ньютон на квадратный метр. Называется эта единица паскаль (сокращенно: Па): $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$. Паскаль очень малая единица. Давление атмосферного воздуха у поверхности Земли, например, приблизительно равно 10^5 Па . В житейском обиходе атмосферное давление обычно выражается в миллиметрах ртутного столба (мм рт. ст.): $1 \text{ мм рт. ст.} = 133,3 \text{ Па}$ ($1,333 \text{ гПа}$).

■ ВОПРОСЫ

1. Какие опытные факты указывают на существование сил взаимодействия между молекулами? 2. Чем различаются газ, жидкость и твердое тело? 3. Что такое идеальный газ? 4. Что происходит при столкновении молекул? Нарушается ли при этом идеальность газа? 5. Каков механизм давления газа на стенки сосуда? Что такое давление? 6. В каких единицах выражается давление?

Самое важное в восьмой главе

Основой молекулярной физики является молекулярно-кинетическая теория строения вещества, утверждающая, что:

- 1) все вещества состоят из частиц — молекул;
- 2) молекулы совершают непрерывные беспорядочные движения;
- 3) между молекулами существуют силы взаимодействия, которые зависят от расстояния между ними и могут быть силами притяжения и отталкивания.

Эти утверждения подтверждаются наблюдениями и многочисленными опытами. Особенно важную роль в доказательстве справедливости молекулярно-кинетической теории играют теория броуновского движения А. Эйнштейна и опыты Ж. Перрена.

Из различных опытов с помощью вычислений можно определить массу молекул, их размеры и число молекул в любом объеме вещества.

Масса m_0 молекулы вычисляется по формуле

$$m_0 = 1,66 \cdot 10^{-27} \cdot M_r \text{ кг},$$

где M_r — относительная молекулярная масса вещества.

Если считать молекулы маленькими шариками, то радиус молекулы оказывается порядка 10^{-10} м .

Число молекул, содержащихся в том или ином теле, определяет величину, называемую количеством вещества в теле. За единицу количества вещества принимается моль — количество вещества, в котором содержится $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ молекул (число молекул в **моле** называется постоянной Авогадро). Число N частиц в любом теле можно вычислить по формулам

$$N = \nu N_A = \frac{m}{M} N_A,$$

где ν — количество вещества в теле, m — масса тела, M — масса моля, или молярная масса вещества.

Для сил взаимодействия между молекулами характерно следующее. Существует такое расстояние r_0 между молекулами, при котором сила взаимодействия между ними равна нулю. При расстоянии $r > r_0$ молекулы притягиваются друг к другу, при $r < r_0$ между молекулами действуют силы отталкивания. Силы взаимодействия (как притяжения, так и отталкивания) сильно зависят от расстояния, очень быстро убывая с ростом расстояния.

В твердых телах и жидкостях межмолекулярные расстояния очень малы (порядка размеров самих молекул), так что силы взаимодействия велики. В газах расстояния между молекулами много больше, а межмолекулярные силы настолько малы, что при определенных условиях (малых давлениях) ими можно пренебречь. Газ, состоящий из невзаимодействующих молекул, называется идеальным газом.

Давление газа обусловлено ударами молекул о стенки сосуда.

От гипотезы к теории

В предыдущей главе мы рассказали, как гипотеза о молекулярном строении вещества была подтверждена опытом, превратившись в молекулярно-кинетическую теорию строения вещества. Теперь нужно выяснить, к каким выводам о свойствах газа приводит эта теория. Легче всего это сделать для идеального газа, молекулы которого не взаимодействуют, и не нужно, следовательно, учитывать силы, действующие между молекулами. С изучения свойств идеального газа мы и начнем.

Так как главная особенность молекул состоит в том, что они непрерывно движутся, то теория идеального газа называется *кинетической*.

Основные идеи кинетической теории газов были высказаны еще в XVIII в. М. В. Ломоносовым. Математически теорию разработал Дж. Максвелл в XIX в.

Видимое проявление молекулярных движений — это давление газа на стенки сосуда. Им газ и обнаруживает свое присутствие. Поэтому первые параграфы главы мы посвятим вычислению давления газа.

Давление газа вызывается ударами молекул о стенку сосуда. Чтобы вычислить давление, надо прежде всего знать, сколько молекул подлетает к стенке за определенный промежуток времени.

Поясним сначала смысл выражения «движения молекул беспорядочны, хаотичны».

Каждая молекула движется с некоторой скоростью $\vec{v}$ (у различных молекул скорости различны и по модулю, и по направлению). Обозначим проекции вектора $\vec{v}$ на оси координат через v_x , v_y и v_z . Один из признаков беспорядочности молекулярных движений состоит в том, что в любой момент времени примерно у одной половины молекул проекция скорости на любую из координатных осей положительна, а у другой — отрицательна. Например, у молекул 1, 2, 3 и 4 (рис. 57) проекции v_x положительны, а у молекул 5, 6, 7 и 8 отрицательны. У молекул 1, 3, 7 и 8 проекции v_y положительны, а у молекул 2, 4, 5 и 6 отрицательны. То же относится к проекциям v_z , хотя на плоском рисунке это показать нельзя.

Это означает, что на участки равной площади любой стенки сосуда или любой площадки внутри газа за заданный промежуток времени попадает в среднем одно и то же число молекул. Отсюда и следует равенство давлений во всех точках (по всем направлениям), о чем говорится в законе Паскаля.

Число ударов молекул о стенку. На рисунке 58 штриховкой выделена некоторая поверхность площадью S , это может быть и стенка сосуда. Наша задача — найти число молекул Z , попадающих на эту поверхность за некоторое время t .

Направим координатную ось X перпендикулярно выделенной поверхности (см. рис. 58). Ясно, что на эту поверхность могут попасть только те молекулы, у которых проекция скорости v_x на ось X не равна нулю и у которых, кроме того, v_x положительна.

Предположим пока, что проекции скорости v_x у всех молекул по модулю одинаковы. Но знак «+» имеют проекции только половины всех молекул (движения молекул беспорядочны).

За время t к выделенной поверхности подлетают слева только те молекулы, которые находятся от нее на расстоянии, не большем чем $v_x t$, потому что такое расстояние проходят

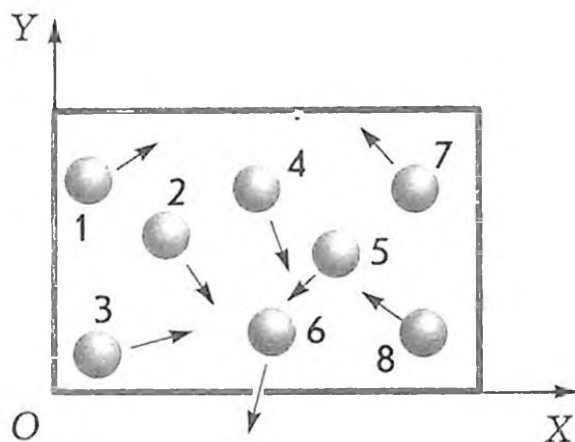


Рис. 57

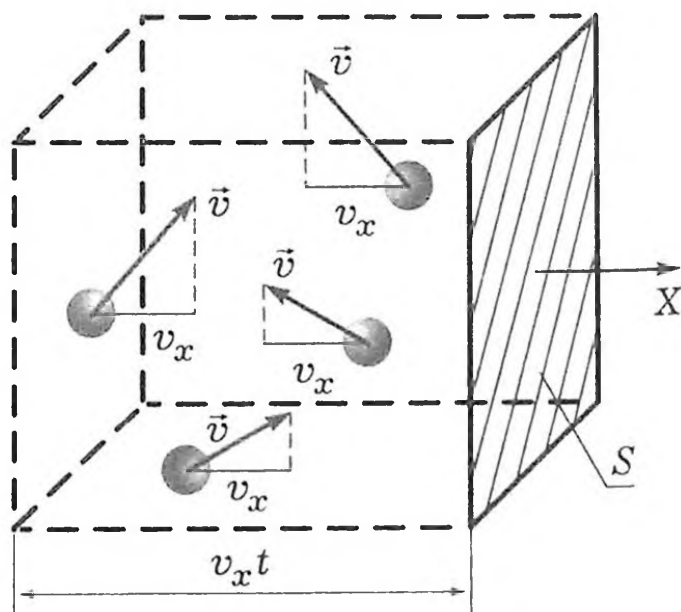


Рис. 58

за время t молекулы, проекция скорости которых равна v_x (напомним, что у них $v_x > 0$). Молекулы, находящиеся на большем расстоянии, за время t «не успевают» дойти до площадки. Следовательно, за время t выделенной поверхности достигнут только те молекулы, которые находятся внутри показанного на рисунке 58 параллелепипеда и имеют положительные проекции скорости v_x . Объем этого параллелепипеда равен произведению площади S на $v_x t$:

$$V = Sv_x t.$$

Пусть в каждой единице объема сосуда имеется n молекул. Тогда в выделенном параллелепипеде их содержится $nV = nSv_x t$. Но только у половины из них проекции скорости v_x положительны. Поэтому число Z молекул, попадающих за время t на выделенную площадку, равно:

$$Z = \frac{1}{2} nSv_x t. \quad (1)$$

В нашем простом расчете мы не учли, что молекулы при движении к площадке неизбежно сталкиваются с другими молекулами и что эти столкновения могут каким-то молекулам «помешать» добраться до площадки. Однако учет столкновений не изменит результата нашего вычисления. Конечно, какая-то молекула на пути к площадке может, испытав столкновение, отклониться и на площадку не попасть. Но зато какая-то другая молекула, двигавшаяся не к площадке, тоже испытав столкновение, изменит свою скорость так, что она попадет именно на площадку. При огромном числе молекул в газе и при хаотичности их движений такая компенсация гарантирована.

■ ВОПРОСЫ

1. В чем состоит хаотичность молекулярных движений? 2. Газ находится в закрытом сосуде. Существует ли в нем какое-нибудь направление, в котором бы двигалось больше частиц, чем в каком-нибудь другом? 3. Зависит ли число молекул, попадающих за заданное время на какую-нибудь площадку, от общего числа молекул в сосуде?

■ УПРАЖНЕНИЕ 11

1. Сколько молекул кислорода попадает на каждый квадратный сантиметр человеческого тела за 1 с? Модуль проекции скорости молекул на любую ось считать равным 250 м/с. Плотность кислорода в воздухе равна 0,29 кг/м³.
2. В сосуде объемом 10 м³ находится водород. Количество вещества равно 1 моль. Сколько молекул водорода ударяется о поверхность стенки площадью 1 м² за 1 с? Стенку считать плоской. Модуль проекции скорости молекул на любую ось считать 1000 м/с.

§ 36

Давление идеального газа. Основное уравнение кинетической теории идеального газа

Зная число молекул, попадающих на площадку, мы можем вычислить и давление газа. Давление газа $p = \frac{F}{S}$. Следовательно, надо знать модуль силы $\vec{F}$, действующей на стенку площадью S . Для вычисления модуля силы $\vec{F}$ мы воспользуемся уравнением второго закона Ньютона в форме

$$\vec{F}t = \Delta (m\vec{v})^1.$$

¹ См. § 15.

Это уравнение означает, что когда на тело действует сила $\vec{F}$ в течение времени t , то в результате импульс тела $m\vec{v}$ изменяется на величину $\Delta(m\vec{v})$, равную $\vec{F}t$.

Возьмем сосуд в форме параллелепипеда объемом V . В нем находится N молекул массой m_0 каждая. Направим оси координат так, как показано на рисунке 59. Молекулы движутся беспорядочно, поэтому на каждую из стенок сосуда действует сила, обусловленная ударами молекул, попадающих на стенку. Если площади стенок различны, то различны и силы, но давления на все стенки, как мы уже выяснили, одинаковы. Поэтому нам достаточно найти давление на какую-то одну стенку, например на правую, перпендикулярную оси X .

Выделим мысленно слой газа, прилегающий к правой стенке. На рисунке 59 он показан пунктиром.

В этот слой за время t влетает Z молекул и столько же из него вылетает. Каждая *влетающая* молекула приносит с собой импульс $m_0 v_x$, где v_x — проекция скорости молекулы на ось X . Каждая *вылетающая* молекула уносит с собой импульс $-m_0 v_x$ (мы по-прежнему считаем, что все проекции v_x одинаковы). Все молекулы, *влетающие в слой*, приносят с собой импульс, равный $Zm_0 v_x$. При столкновениях этот импульс передается молекулам слоя и увеличивает его общий импульс на величину $Zm_0 v_x$. Молекулы же, *вылетающие из слоя*, уносят с собой отрицательный импульс, равный $-Zm_0 v_x$. Но молекула вылетает из слоя потому, что она столкнулась с другой молекулой, которая при этом получила такой же по модулю положительный импульс, испытав, как говорят, отдачу. Поэтому и *вылетающие* молекулы увеличивают импульс слоя на величину $Zm_0 v_x$. Иллюстрацией этому может служить тележка, которой сообщает положительный импульс не только вскакивающий на нее человек (рис. 60), но и человек, соскакивающий с нее в противоположном направлении.

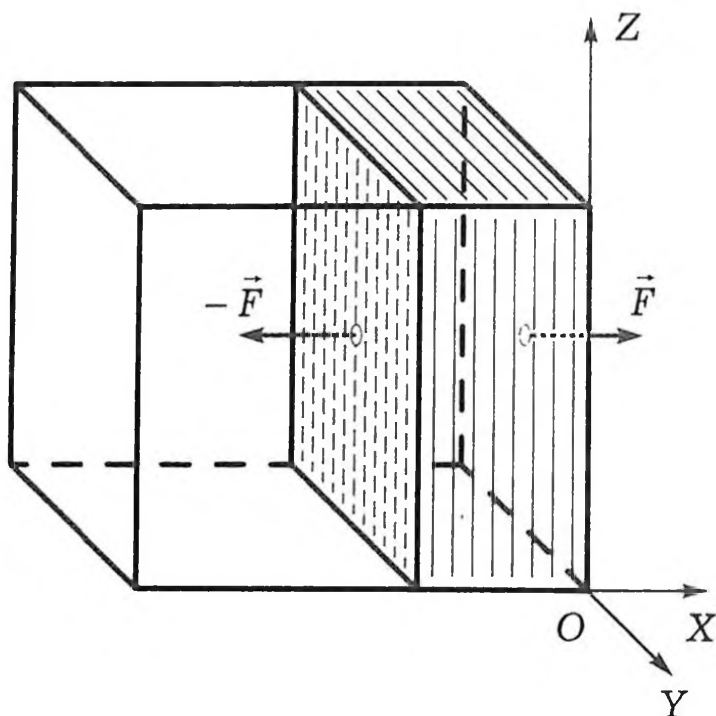


Рис. 59

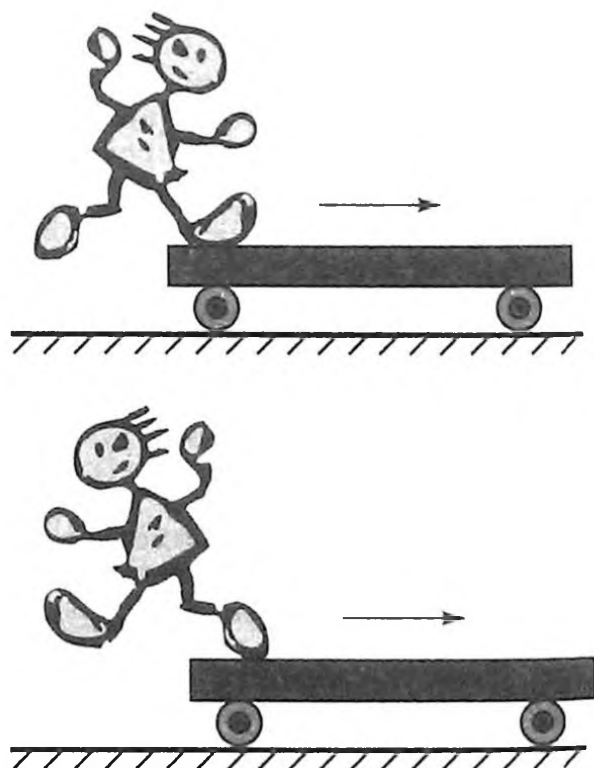


Рис. 60

Таким образом, общее увеличение импульса слоя $\Delta(mv_x)$ за время t равно $2Zm_0v_x$. Подставив сюда значение $Z = \frac{1}{2}nSv_xt$, получаем:

$$\Delta(mv_x) = 2Zm_0v_x = nm_0v_x^2tS.$$

Но газ в сосуде находится в равновесии. Пристенный слой тоже покоится вместе с газом («ветра» в слое нет), несмотря на полученный им импульс. Это значит, что слой получил такой же импульс противоположного знака, сообщенный ему силой, действующей со стороны стенки сосуда. С такой же по модулю силой газ действует на стенку.

Таким образом, на стенку сосуда действует сила $\vec{F}$, модуль которой можно вычислить из формулы

$$Ft = nm_0v_x^2tS; F = nm_0v_x^2S.$$

Так как давление $p = \frac{F}{S}$, то, разделив это значение F на площадь S стенки, будем иметь:

$$p = nm_0v_x^2. \quad (1)$$

Это выражение мы получили, полагая, что у всех молекул газа одинаковые значения v_x . В действительности и скорости $\vec{v}$, и проекции скорости v_x различны. Поэтому в формулу (1) вместо v_x^2 надо поставить среднее значение этой величины, которое мы обозначим $\overline{v_x^2}$. Тогда

$$p = nm_0\overline{v_x^2}. \quad (2)$$

Давление газа на все стенки одинаково. Проведя те же рассуждения и вычислив давление газа на стенки сосуда, перпендикулярные осям Y и Z , найдем:

$$p = nm_0\overline{v_y^2} \quad (3)$$

и

$$p = nm_0\overline{v_z^2}. \quad (4)$$

Сложим теперь правые и левые части равенств (2), (3) и (4):

$$3p = nm_0(\overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2}).$$

Отсюда

$$p = \frac{1}{3}nm_0(\overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2}).$$

На рисунке 61 показан некоторый вектор $\vec{v}$ и его проекции на оси X , Y и Z — v_x , v_y , v_z . Применив теорему Пифагора к прямоугольным треугольникам OAB и OBC , получим:

$$v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2.$$

Это же соотношение, разумеется, относится также и к средним значениям этих величин:

$$\overline{v^2} = \overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2}.$$

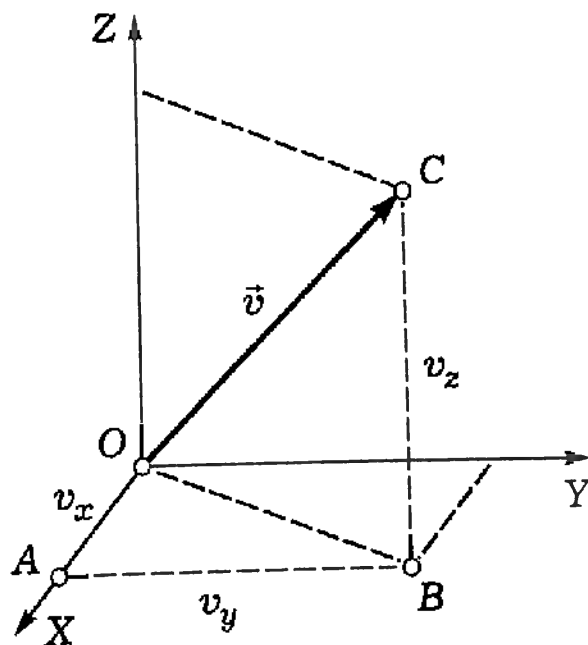


Рис. 61

Здесь $\overline{v^2}$ — *среднее значение квадрата скорости* молекул. Теперь формула для давления принимает вид:

$$p = \frac{1}{3} n m_0 \overline{v^2}. \quad (5)$$

В эту формулу входит не проекция скорости, а модуль самой скорости молекул.

Физический смысл формулы для давления станет более ясным, если правую часть формулы (5) мы умножим и разделим на 2. Тогда

$$p = \frac{2}{3} n \frac{m_0 \overline{v^2}}{2}. \quad (6)$$

Здесь $\frac{m_0 \overline{v^2}}{2}$ — *средняя кинетическая энергия* молекул газа. Таким образом, давление идеального газа равно двум третям средней кинетической энергии поступательного движения молекул, содержащихся в единице объема газа.

В формулу для давления газа входит *средняя* кинетическая энергия, а не энергия каждой молекулы. Это связано с тем, что молекул очень много (см. § 32), так что определить энергию каждой из них невозможно. И не только невозможно, но и не нужно, потому что при грандиозно большом числе молекул энергия отдельной молекулы не может играть роли, сколько-нибудь существенной для всего того, что происходит в газе.

Давление — величина, относящаяся к газу в целом, но определяется она *средним* значением величины (кинетической энергии), относящейся к большому числу молекул газа. Поэтому о давлении газа говорят, что давление — это *величина статистическая*.

Уравнение (6) называется *основным уравнением кинетической теории газов*.

■ ВОПРОСЫ

1. От каких величин зависит давление газа?
2. Зависит ли давление газа в сосуде от числа молекул в нем?
3. Имеется два сосуда с одинаковым числом молекул газа в них. В каком случае давления в них будут одинаковы?
4. Имеет ли смысл вопрос: «Какое давление оказывает на стенку сосуда одна молекула?»

■ УПРАЖНЕНИЕ 12

1. Вычислите среднее значение квадрата скорости молекул азота, если плотность азота в сосуде и давление соответственно равны $1,24 \text{ кг/м}^3$ и 10^5 Па .
2. В сосуде объемом 1 м^3 содержится идеальный газ. Количество вещества равно 1 моль. Чему равна средняя кинетическая энергия его молекул? Давление газа 10^5 Па .

§ 37 Температура

Кинетическая теория газов привела нас к выводу, что давление газа определяется концентрацией молекул n и средней кинетической энергией его молекул $\frac{m_0 \overline{v^2}}{2}$.

Величина n равна $\frac{N}{V}$, где N — число молекул в сосуде и V — объем сосуда. Если сосуд закрытый, то объем газа измениться не может. Тогда не изменяется и n . Это значит, что давление газа при постоянном объеме определяется *только* средней кинетической энергией молекул: чем больше $\frac{m_0 v^2}{2}$, тем больше и давление p газа.

С другой стороны, давно известно, что давление газа в закрытом сосуде (т. е. при постоянном объеме) увеличивается при нагревании и уменьшается при охлаждении. Но мы привыкли к тому, что нагревание — это повышение температуры, а охлаждение — ее понижение. Значит, между $\frac{m_0 v^2}{2}$ и температурой должна существовать связь. Что это за связь? И что такое температура?

Термометр. Понятие температуры, не зная ее физического смысла, люди использовали задолго до создания кинетической теории (с начала XVII в.). Давно был изобретен и прибор для измерения температуры — *термометр*. Устройство термометра основано на том, что многие величины, характеризующие свойства вещества, изменяются при нагревании и охлаждении. Например, жидкости или газы при нагревании увеличивают свой объем (расширяются). Электрическое сопротивление металлической проволоки увеличивается при нагревании и уменьшается при охлаждении; сопротивление полупроводников, наоборот, при нагревании уменьшается и т. д.

В широко применяемых жидкостных термометрах о температуре судят по длине столбика жидкости в стеклянной трубке с резервуаром на нижнем конце (рис. 62). На линейке, скрепленной с трубкой, ставят цифры 0 и 100 в точках, которых достигает уровень жидкости, например ртути, когда резервуар погружают в тающий лед и в пары кипящей воды. Расстояние между этими точками делят на 100 равных частей, называемых *градусами Цельсия* (обозначается: °C). Если при измерении уровень ртути устанавливается ниже деления 0, температура считается отрицательной.

Показания термометров, подобных только что рассмотренному, зависят от свойств используемых в них веществ (например, от свойств ртути и стекла) и от выбранной шкалы. Ведь интервал между нижней и верхней отметками можно разделить и не на 100 частей (такие термометры в самом деле существуют). И цифры у нижней и верхней отметок можно выбрать другие (есть и такой термометр). Поэтому и температурная шкала, и считываемые по ней числа не имеют явного физического смысла.

Температура и тепловое равновесие. С помощью термометра был открыт важный закон природы — *закон теплового равновесия*. Состоит он в следующем. Если имеется *изолированная* (не взаимодействующая с другими телами) система тел, температуры которых в какой-то

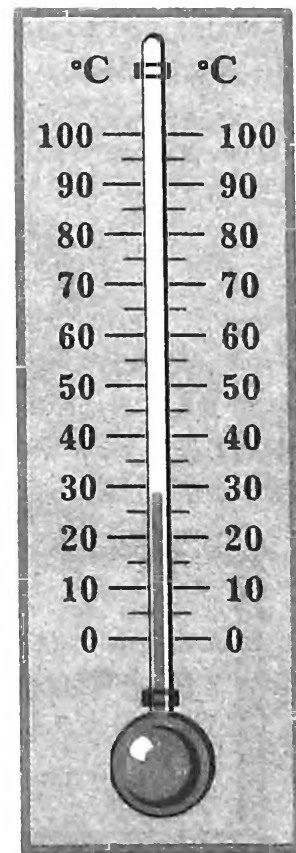


Рис. 62

момент времени различны, то через некоторое время температуры всех этих тел станут одинаковыми. О такой системе тел говорят, что она находится в состоянии *теплового равновесия*. После установления теплового равновесия температуры тел уже изменяться не будут. Изменяться они могут только в результате внешнего воздействия.

С тепловым равновесием связано само измерение температуры. Когда мы для измерения температуры тела приводим термометр в контакт с этим телом, то, прежде чем отсчитать показания термометра, нужно подождать, пока термометр и тело придут в состояние теплового равновесия. Только после этого можно утверждать, что температура тела равна показанию термометра. В этом и состоит основное свойство величины, называемой температурой: температура одинакова у любых тел, находящихся в состоянии теплового равновесия.

Числа, которые мы отсчитываем по шкале термометра, относятся к самому термометру (например, длина ртутного столбика), а не к тому телу, температура которого измеряется. Термометр измеряет свою собственную температуру. Но ясно, что у тел, находящихся в состоянии теплового равновесия, должна быть одинаковой и какая-то величина, относящаяся к самим телам, к молекулам, из которых они состоят. Она и должна считаться температурой *тела*.

Эту величину мы можем найти, используя наши знания об идеальном газе.

Физический смысл температуры. Возьмем несколько различных сосудов известных объемов, соединенных с манометрами — приборами, измеряющими давление газа. Заполним их различными газами, т. е. газами с различными молярными массами, например азотом, кислородом, гелием и т. д. Давления газов в сосудах могут быть различными, так же как и их массы. Массы газов могут быть определены взвешиванием откачанных и заполненных сосудов.

Погрузим все эти сосуды в тающий лед (рис. 63). Мы тотчас заметим, что давление газов в сосудах начинает падать, очевидно, вследствие

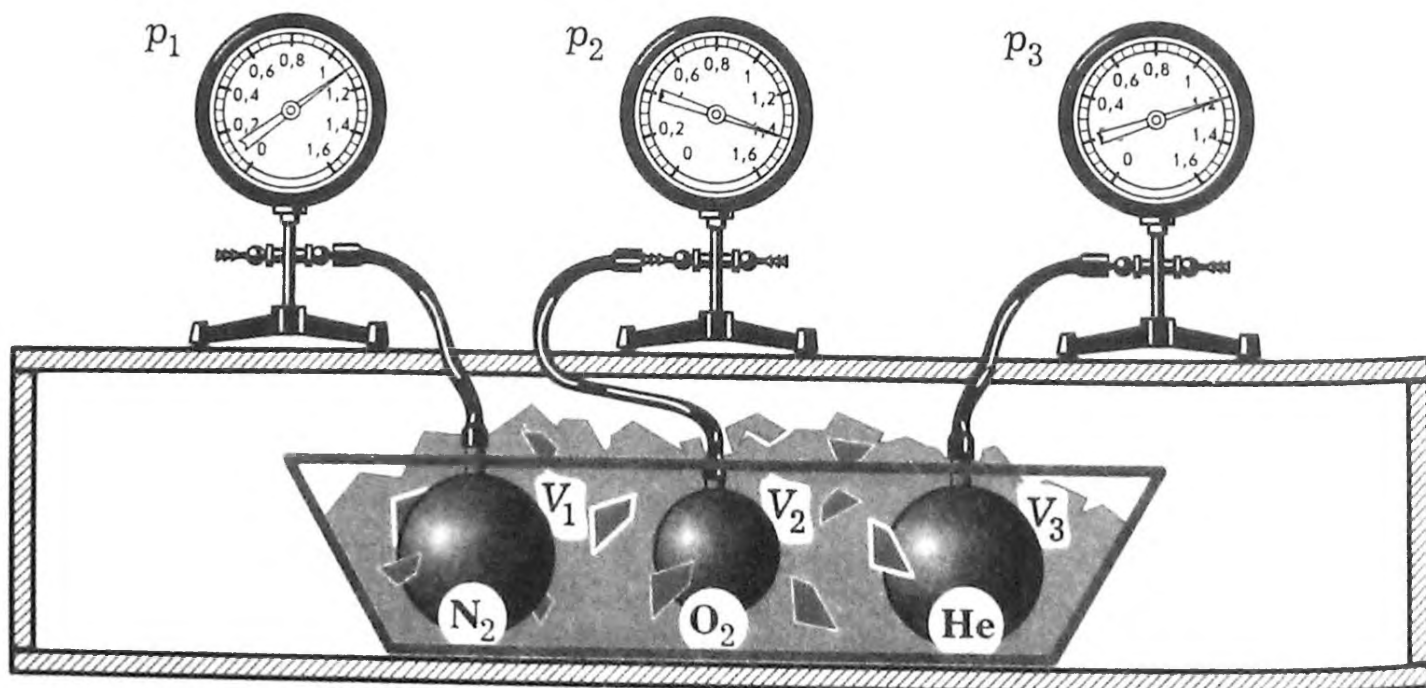


Рис. 63

охлаждения. Но через некоторое время давление перестанет уменьшаться и в дальнейшем остается неизменным. Это значит, что охлаждение прекратилось и температура всех газов стала такой же, как у тающего льда: между газами и тающим льдом, а также между самими газами установилось тепловое равновесие. Теперь нам нужно найти величину, относящуюся к газам, которая у всех газов одинакова. Она и должна считаться температурой.

Для каждого из газов известны масса m , давление p и объем V . Можно поэтому вычислить и число молекул N в каждом сосуде: $N = \frac{m}{M} N_A$, где N_A — постоянная Авогадро. Легко вычислить и число молекул в единице объема: $n = \frac{N}{V}$. Тогда оказывается, что одинаковой у всех газов будет величина $\frac{p}{n}$ — отношение давления газа к числу молекул в единице объема. Но

согласно основному уравнению кинетической теории газов $p = \frac{2}{3} n \frac{m_0 \overline{v^2}}{2}$.

Отсюда $\frac{p}{n} = \frac{2}{3} \frac{m_0 \overline{v^2}}{2}$, или $\frac{3}{2} \frac{p}{n} = \frac{m_0 \overline{v^2}}{2}$.

Если для всех газов, находящихся в тепловом равновесии, одинаково отношение $\frac{p}{n}$, то для них одинакова и величина $\frac{3}{2} \frac{p}{n}$, а значит, и величина $\frac{m_0 \overline{v^2}}{2}$: у любых газов, находящихся в тепловом равновесии друг с другом, одинаковы средние кинетические энергии хаотического движения молекул.

Так мы нашли физическую величину, относящуюся к газу (а не к термометру!), обладающую «свойством» температуры — быть одинаковой у тел, находящихся в тепловом равновесии. Это средняя кинетическая энергия беспорядочных молекулярных движений: $\frac{m_0 \overline{v^2}}{2}$. Тело с более высокой температурой, тело более «теплое» — это тело с более высоким значением величины $\frac{m_0 \overline{v^2}}{2}$. Поэтому хаотические движения молекул обычно называют *тепловыми движениями*.

Мы выяснили физический смысл температуры на примере идеального газа. Но этот вывод справедлив и для других тел, в том числе и для тех тел, которые называются термометрами: температура тела — это величина, равная средней кинетической энергии тепловых движений частиц тела.

■ ВОПРОСЫ

1. Какие свойства тел используются в термометре?
2. В чем состоит закон теплового равновесия?
3. Каков физический смысл температуры?
4. Почему хаотические движения молекул называются тепловыми движениями?

В предыдущем параграфе мы выяснили, что температура — это средняя кинетическая энергия тепловых молекулярных движений. В таком случае она должна выражаться в единицах энергии — в джоулях.

Но понятие температуры было введено задолго до того, как выяснилась ее истинная природа. Давно была выбрана и единица температуры — градус, которым пользуются и до сих пор. Поэтому нужно выяснить, как связаны между собой традиционная единица — градус и «истинная» единица — джоуль.

Как известно, градус — это $\frac{1}{100}$ часть разности температур кипящей воды и тающего льда. По шкале Цельсия вода кипит при 100°C , а лед плавится при 0°C . А чему равна температура кипящей воды в джоулях? При какой температуре, выраженной в джоулях, плавится лед?

Измерить среднюю кинетическую энергию $\frac{m_0 \overline{v^2}}{2}$ молекул мы, конечно, не можем. Но совсем нетрудно измерить давление p газа, когда он находится в контакте с кипящей водой и с тающим льдом. И если нам известна масса газа и его молярная масса, то мы легко найдем и значения величины $\frac{3}{2} \frac{p}{n}$ (которая равна $\frac{m_0 \overline{v^2}}{2}$) при 100°C и при 0°C . Такие измерения делались много раз. Оказалось, что для газа, погруженного в кипящую воду, значение $\frac{3}{2} \frac{p}{n}$ (а значит, и $\frac{m_0 \overline{v^2}}{2}$) в 1,3661 раза больше, чем для того же га-

за, погруженного в тающий лед. Разность же этих значений равна $\frac{3}{2} \cdot 1,38 \cdot 10^{-21}$ Дж. Разделив эту разность на 100, мы найдем, что одному градусу соответствует $\frac{3}{2} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж¹.

Величину $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/ $^\circ\text{C}$ называют *постоянной Больцмана* (в честь австрийского физика Людвиг Больцмана) и обозначают буквой k :

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж}/^\circ\text{C}.$$

Таким образом, $\frac{3}{2} k$ — это и есть соотношение между джоулем и градусом.

Абсолютная температура и абсолютный нуль температуры. Мы определили температуру как величину, равную средней кинетической энергии хаотических поступательных движений молекул. Поэтому температура обратится в нуль, если будет равна нулю величина $\frac{m_0 \overline{v^2}}{2}$. Это абсолютный предел для понижения температуры, потому что кинетическая энергия отрицательной быть не может. Температуру, при которой прекратились бы *беспорядочные* молекулярные



Больцман
Людвиг
(1844—1906)

¹ Числа $3/2$ и $1,38 \cdot 10^{-23}$ можно, конечно, перемножить. Но принято сохранять множитель $3/2$. По этой же причине (так принято!) пишут $3/2$, а не 1,5.

движения, называют *абсолютным нулем* температуры. От него и должна отсчитываться температура.

Шкала, по которой температура **отсчитывается** от абсолютного нуля, называется абсолютной шкалой температур или *шкалой Кельвина*. А температура, отсчитываемая по этой шкале, называется *абсолютной температурой*. Обозначают ее буквой T и выражают в кельвинах (сокращенно: К). Но единица температуры кельвин ничем не отличается от градуса Цельсия. В соответствии с этим **постоянная** Больцмана выражается не в Дж/°С, а в Дж/К: $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К.

При абсолютном нуле температуры ($T = 0$ К) средняя кинетическая энергия тепловых движений молекул равна нулю. При температуре 1 К она равна $\frac{3}{2} k \cdot 1$ К, при температуре 2 К она равна $\frac{3}{2} k \cdot 2$ К и т. д. Вообще если температура равна T , то средняя энергия хаотических тепловых движений молекул определяется равенством

$$\frac{m_0 \overline{v^2}}{2} = \frac{3}{2} kT. \quad (1)$$

Абсолютная шкала температур и шкала Цельсия. Шкала Цельсия построена так, что температуре таяния льда приписывается значение нуль, а температуре кипения воды — значение 100. Именно приписывается, потому что нет, конечно, никаких физических оснований считать, что у тающего льда... нет температуры (температура равна нулю), а у кипящей воды она выражается именно числом 100. Но теперь, когда мы ввели абсолютную шкалу температур и нашли соотношение между джоулем и градусом, мы можем найти абсолютную температуру и тающего льда, и кипящей воды, а также выразить обе эти температуры в джоулях.

Выше мы видели, что, как показывает опыт, значение величины $\frac{m_0 \overline{v^2}}{2}$ при температуре кипящей воды в 1,3661 раза больше, чем при температуре тающего льда. Это значит, что и температура $T_{к.в}$ кипящей воды в 1,3661 раза больше температуры $T_{т.л}$ тающего льда:

$$T_{к.в} = 1,3661 T_{т.л}. \quad (2)$$

Но градусы температурной шкалы выбраны так, что

$$T_{к.в} - T_{т.л} = 100 \text{ К}. \quad (3)$$

Подставив в формулу (3) вместо $T_{к.в}$ ее значение из соотношения (2), получаем:

$$1,3661 T_{т.л} - T_{т.л} = 0,3661 T_{т.л} = 100 \text{ К}.$$

Отсюда

$$T_{т.л} = 273,15 \text{ К}.$$

Температура тающего льда равна 273,15 К. Очевидно, температура кипящей воды равна 373,15 К.

Абсолютная температура наряду с длиной, массой, временем и количеством вещества входит в число **основных** величин международной системы единиц (СИ). Единица температуры кельвин, как и единицы метр, килограмм, секунда и моль, — одна из **основных** единиц этой системы.

В физике обычно пользуются **абсолютной температурой** и шкалой Кельвина, названной так в честь английского физика У. Кельвина. В технике часто, а в быту всегда температуру выражают в градусах Цельсия (обозначают

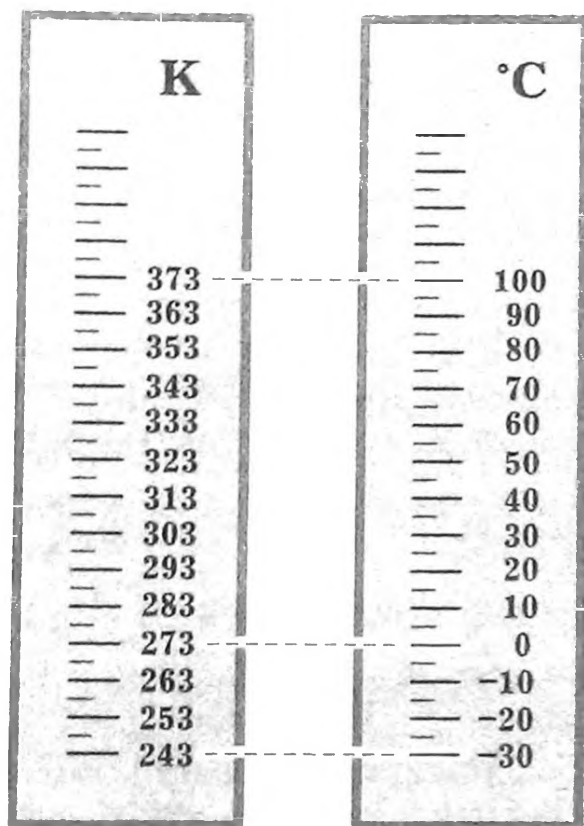


Рис. 64

ее буквой t). Так, температура тающего льда $t_{т.л} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, но $T_{т.л} = 273,15\text{ К}$; температура кипящей воды $t_{к.в} = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, но $T_{к.в} = 373,15\text{ К}$. Вообще

$$t = T - 273,15, \quad T = t + 273,15.$$

На шкале Цельсия абсолютному нулю соответствует температура $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Температурные шкалы Цельсия и Кельвина показаны на рисунке 64.

Единица температуры джоуль. Теперь мы можем ответить на вопрос, поставленный в начале параграфа: при каких температурах, если их выражать в джоулях, кипит вода и тает лед?

Подставив в формулу (1) значение постоянной Больцмана ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}\text{ Дж/К}$) и значения T для кипящей воды ($373,15\text{ К}$) и тающего льда ($273,15\text{ К}$), мы получим, что вода кипит при температуре $1,53 \cdot 10^{-20}\text{ Дж}$, лед же тает при температуре $1,13 \cdot 10^{-20}\text{ Дж}$. Отсюда видно, что джоуль не очень удобная единица температуры.

■ ВОПРОСЫ

1. Как связаны между собой джоуль и градус? 2. Чему равна постоянная Больцмана?
3. В чем отличие между абсолютной шкалой температур и шкалой Цельсия? Что общего у этих температурных шкал? 4. Как связаны между собой средняя кинетическая энергия молекул и абсолютная температура? 5. Как связаны между собой значения температур, выраженных в градусах Цельсия и в кельвинах? 6. Почему ни в технике, ни в быту не пользуются джоулем как единицей температуры?

■ УПРАЖНЕНИЕ 13

1. Чему равна абсолютная температура (в джоулях) тела здорового человека?
2. Человек серьезно болен, если температура его тела изменилась на 2 К . На сколько при этом изменилась средняя кинетическая энергия молекул тела?
3. Чему равна средняя кинетическая энергия хаотических движений молекул вещества при температуре 10^3 К ? 10^6 К ? 10^9 К ?
4. В сосуде объемом 10 л , погруженном в тающий лед, находится 1 моль идеального газа. Присоединенный к сосуду манометр показывает, что давление газа в сосуде равно 226 кПа . Вычислите постоянную Больцмана.
5. В ускорителе получают быстрые частицы с энергией $1,1 \cdot 10^{-8}\text{ Дж}$. Какова была бы температура газа с такой средней энергией частиц?
6. Какова средняя кинетическая энергия тепловых движений частиц в газовом облаке, температура которого равна $2 \cdot 10^7\text{ К}$?

§ 39 Уравнение состояния идеального газа

В предыдущем параграфе мы получили выражение для средней кинетической энергии тепловых движений молекул: $\frac{m_0 \overline{v^2}}{2} = \frac{3}{2} kT$. Подставим

его в основное уравнение кинетической теории газов $p = \frac{2}{3} n \frac{m_0 \overline{v^2}}{2}$. Тогда мы получим, что давление газа равно

$$p = nkT.$$

Заменив здесь n выражением $\frac{N}{V}$, где N — число молекул газа и V — его объем, получаем:

$$pV = NkT. \quad (1)$$

Это уравнение связывает три величины: давление газа p , его объем V и температуру T . Эти величины, как говорят, определяют *состояние* газа (четвертая величина — число молекул N — предполагается неизменной). Поэтому уравнение (1) называется *уравнением состояния* идеального газа. Его можно записать и в другом виде. Так как $N = \nu N_A$, где ν — количество вещества и N_A — постоянная Авогадро, то $pV = \nu N_A kT$. Но произведение двух постоянных N_A и k — это тоже постоянная. Ее называют газовой постоянной и обозначают буквой R :

$$R = kN_A = 6,02 \cdot 10^{23} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}} = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}.$$

Теперь уравнение состояния принимает вид:

$$pV = \nu RT. \quad (2)$$

Наконец, количество вещества ν можно выразить через массу газа m и его молярную массу M : $\nu = \frac{m}{M}$. Тогда уравнение состояния (2) заменится таким:

$$pV = \frac{m}{M} RT. \quad (3)$$

В таком виде уравнение состояния было получено Б. Клапейроном и Д. И. Менделеевым и в их честь называется *уравнением Клапейрона — Менделеева*.

Нужно помнить, что молярная масса M в уравнении (3), выраженная в килограммах, численно равна $10^{-3} \cdot M_r$, где M_r — относительная молекулярная масса вещества.

Состояние газа может изменяться. Уравнение состояния газа в форме (1), (2) или (3) связывает три величины: давление p , объем V и температуру T . Все эти величины могут изменяться. Изменение любой из них означает изменение состояния газа. Газ можно нагревать или охлаждать, т. е. изменять его температуру. При этом могут изменяться объем газа и его давление. Газ можно сжимать, и он может расширяться. При этом могут изменяться его давление и температура. Уравнение состояния позволяет учитывать эти связан-



Менделеев
Дмитрий
Иванович
(1834—1907)

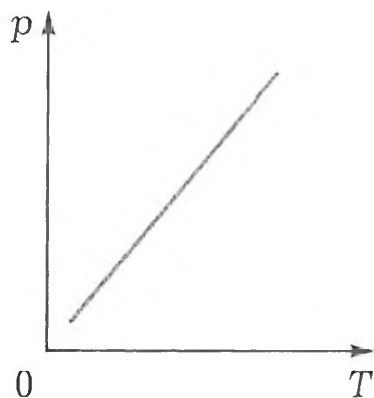


Рис. 65

ные друг с другом изменения и вычислять любую из трех величин, если известны две другие. При изучении процессов, происходящих с газами, уравнение состояния играет такую же роль, какую законы Ньютона играют при изучении движения тел.

Газы играют важную роль в природе и технике. Достаточно напомнить, что Земля окружена газовой оболочкой. Шины автомобилей заполняются газом (воздухом). Именно газы, расширяясь, выталкивают пулю из ружья и снаряд из пушки. Газы же вырываются из сопел ракет, вращают турбины и толкают поршни в двигателях. Во всех этих и многих других

случаях происходят изменения состояния газа. Понятно, как важно заранее знать, к чему приведет то или иное изменение состояния газа. Уравнение состояния и позволяет это сделать.

Изменение состояния газа необязательно означает изменение всех трех величин, входящих в уравнение состояния газа. Любую из них можно поддерживать неизменной. Тогда изменение одной из двух оставшихся величин приведет к изменению другой. Рассмотрим эти случаи.

Объем газа постоянен. Объем газа остается постоянным, если газ заключен в запаянный или закрытый (например, с помощью крана) сосуд.

Газ в таком сосуде можно, однако, нагревать или охлаждать, т. е. изменять его температуру. Как при этом изменяется давление? Уравнение состояния дает ответ на этот вопрос. Из уравнения состояния (например, в форме (2)) следует, что

$$p = \frac{\nu R}{V} T.$$

Отсюда видно, что давление газа прямо пропорционально температуре, а величина $\frac{\nu R}{V}$ — это коэффициент пропорциональности между p и T . Графически зависимость p от T при постоянном V показана на рисунке 65. Процесс, происходящий в газе при постоянном объеме, называется *изохорным*.

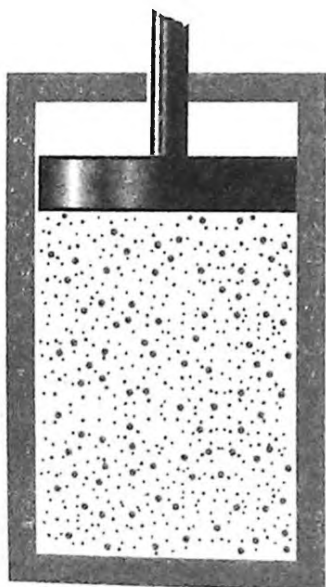


Рис. 66

Давление газа постоянно. Газ может находиться и в таких условиях, когда его давление не изменяется. Для этого он должен находиться не в запаянном сосуде, а в сосуде, закрытом подвижным поршнем (рис. 66). Если почему-либо давление газа увеличится, поршень тотчас же сдвинется и установится в таком положении, чтобы давление под ним было таким же, как внешнее. То же произойдет, если давление газа уменьшится. И в том и в другом случае изменяется объем газа. А изменяться он может потому, что газ нагревают или охлаждают. Как именно изменяется объем газа при нагревании и охлаждении, мы тоже узнаем из уравнения состояния. Из него (см. формулу (2)) получаем, что

$$V = \frac{\nu R}{p} T,$$

откуда следует, что объем газа прямо пропорционален температуре, а величина $\frac{\nu R}{p}$ — это коэффициент пропорциональности между V и T .

Графически процесс изменения объема газа в зависимости от изменения его температуры показан на рисунке 67. Процесс, происходящий при постоянном давлении, называется *изобарным*.

Температура газа постоянна. Газ, наконец, может находиться и в таких условиях, что постоянной остается его температура. Для этого он должен находиться в сосуде, объем которого может изменяться (например, в сосуде с подвижным поршнем), а сосуд должен быть приведен в контакт с телом, имеющим постоянную температуру, так, чтобы между этим телом и сосудом с газом установилось тепловое равновесие. Таким телом может служить проточная вода, большое количество льда, окружающий воздух и т. п. Тело, обеспечивающее постоянство температуры, называется *термостатом*.

Если температура газа остается постоянной, то изменяться могут его давление и объем. Уравнение состояния показывает, как именно изменяются эти две величины. Из уравнения состояния $pV = \nu RT$ сразу видно, что при постоянной температуре правая часть уравнения — величина постоянная. Следовательно,

$$pV = \text{const, или } p = \frac{\text{const}}{V} = \frac{\nu RT}{V}.$$

Это значит, что давление газа обратно пропорционально его объему. Такое свойство газа широко используется во всякого рода амортизаторах, в надувных шинах автомобильных колес и т. д.

Процесс сжатия и расширения газа при постоянной температуре называется *изотермическим* процессом. На рисунке 68 показан график зависимости давления газа от его объема при постоянной температуре. В отличие от графиков, приведенных на рисунках 65 и 67, график зависимости p от V не прямая линия, а кривая. Называется такая кривая *изотермой*. В математике кривая, графически представляющая обратную пропорциональность двух величин, называется гиперболой.

Закон Авогадро и закон Дальтона. Из уравнения состояния можно получить два следствия. Напишем уравнение состояния в форме $pV = NkT$. Отсюда число молекул N равно

$$N = \frac{pV}{kt}. \quad (4)$$

Из этого выражения видно, что если различные газы занимают при одинаковых температурах и одинаковых давлениях равные объемы, то число молекул N тоже одинаково. Это утверждение было установлено опытным путем итальянским химиком А. Авогадро в 1811 г., и называется по этому *законом Авогадро*:

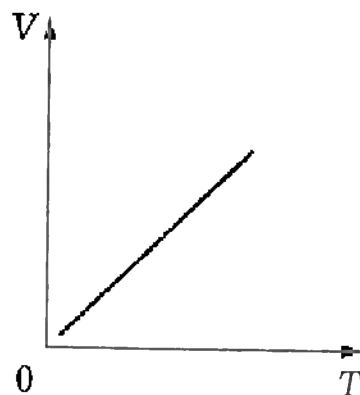


Рис. 67

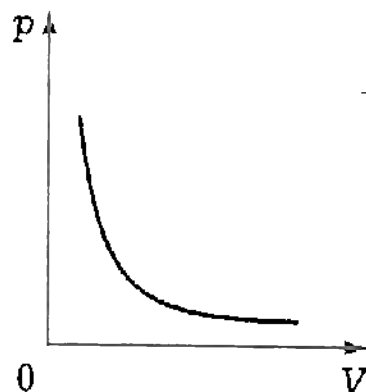


Рис. 68

При равных давлениях и температурах в любых газах одинаковых объемов содержится одинаковое число молекул.

Из уравнения состояния газа можно получить еще одно следствие, относящееся к давлению смеси различных газов.

Представим себе, что в сосуде объемом V находится смесь нескольких газов. Обозначим давление каждого из газов при отсутствии остальных через $p_1, p_2, p_3, \dots$. Давления $p_1, p_2, p_3, \dots$ называются *парциальными* давлениями газов, составляющих смесь.

Для каждого газа можно написать уравнение состояния в виде:

$\frac{N_1}{V} kT = p_1, \frac{N_2}{V} kT = p_2, \frac{N_3}{V} kT = p_3, \dots$, где $N_1, N_2, N_3, \dots$ — число молекул каждого из газов.

Сложив почленно левые и правые части уравнений, получим:

$$\frac{kT}{V} (N_1 + N_2 + N_3 + \dots) = p_1 + p_2 + p_3 + \dots$$

Но $N_1 + N_2 + N_3 + \dots$ — это общее число молекул смеси газов. Отсюда следует, что

$$\frac{N}{V} kT = p_1 + p_2 + p_3 + \dots$$

Так как $\frac{N}{V} kT = p$, где p — давление смеси газов, то

$$p = p_1 + p_2 + p_3 + \dots$$

Это утверждение было открыто экспериментально в 1801 г. английским физико-химиком Д. Дальтоном и называется *законом Дальтона*:

Давление смеси газов равно сумме парциальных давлений каждого из газов.

■ ВОПРОСЫ

1. Напишите уравнение состояния идеального газа для 1 моль газа. 2. Какие величины характеризуют состояние газа? 3. Что такое изохорный процесс? изобарный? изотермический? 4. Как обеспечивается изохорность процесса в газе? изобарность? изотермичность? 5. Что означает выражение «изменение состояния газа»? 6. На рисунке 69 изображен графически изотермический процесс в различных координатных осях (p, V), (V, T) и (p, T). Назовите для каждого из графиков его координатные оси.

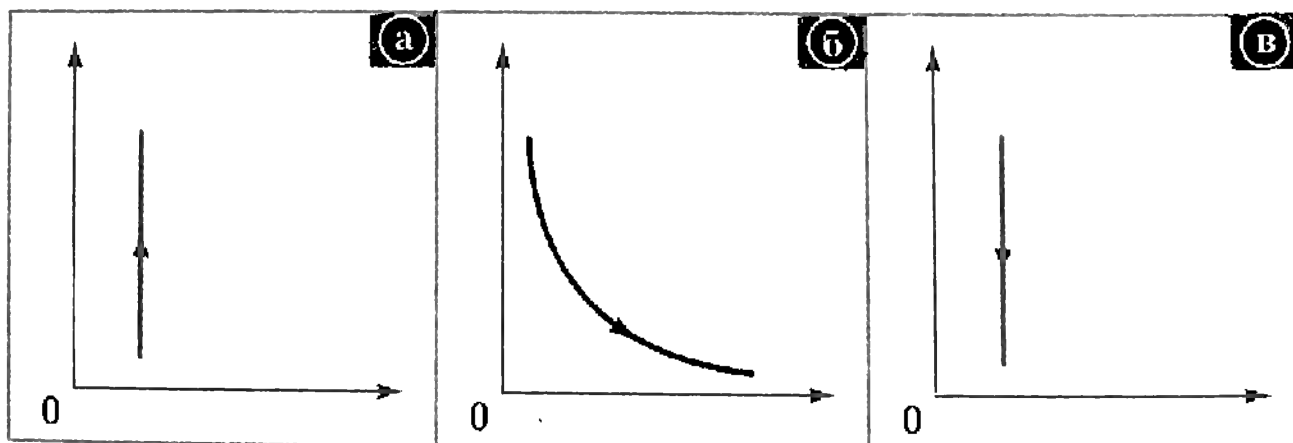


Рис. 69

■ ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

1. Сколько молекул находится в комнате объемом 250 м^3 при температуре 27°С и атмосферном давлении 10^5 Па ?

Решение. Воспользуемся уравнением состояния газа $pV = NkT$. По условию задачи $p = 10^5 \text{ Па}$, $V = 250 \text{ м}^3$, $T = 300 \text{ К}$. Следовательно,

$$N = \frac{pV}{kT} = \frac{10^5 \text{ Па} \cdot 250 \text{ м}^3}{1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \cdot 3 \cdot 10^2 \text{ К}} = 6 \cdot 10^{27}.$$

2. Газ находится в сосуде объемом 1 л. Количество газа 1 моль. Каково давление газа? Температуру газа считать равной 300 К .

Решение. Более удобным для решения является уравнение состояния в форме $pV = \nu RT$. Отсюда $p = \frac{\nu RT}{V}$. Подставляя данные задачи, находим:

$$p = \frac{1 \text{ моль} \cdot 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \cdot 3 \cdot 10^2 \text{ К}}{1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3} = 2,5 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

3. В закрытом сосуде объемом 1 л содержится кислород массой 12 кг. Найдите его давление при температуре 20°С .

Решение. Воспользуемся уравнением состояния в форме $pV = \frac{m}{M} RT$. Отсюда

$$p = \frac{mRT}{MV}.$$

Относительная молекулярная масса кислорода равна 32. Следовательно, молярная масса кислорода равна $32 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$. Подставляя это значение и данные из условия задачи в формулу для давления, находим:

$$p = \frac{12 \text{ кг} \cdot 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \cdot 293 \text{ К}}{32 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}} \cdot 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3} = 9,1 \cdot 10^8 \text{ Па}.$$

4. Постройте график изотермического процесса идеального газа в координатных осях (p , V), если начальные давление и объем равны соответственно 6 кПа и 1 м^3 , а конечное давление равно 1 кПа .

Решение. Из уравнения состояния идеального газа $pV = \nu RT$ следует, что в изотермическом процессе для данного количества газа (ν) νRT — величина постоянная: $pV = \text{const}$.

Следовательно, p и V — величины, обратно пропорциональные друг другу.

Для построения графика этого процесса составим таблицу соответствующих значений p и V .

$p, \text{ кПа}$	6	5	4	3	2	1
$V, \text{ м}^3$	1	1,2	1,5	2	3	6

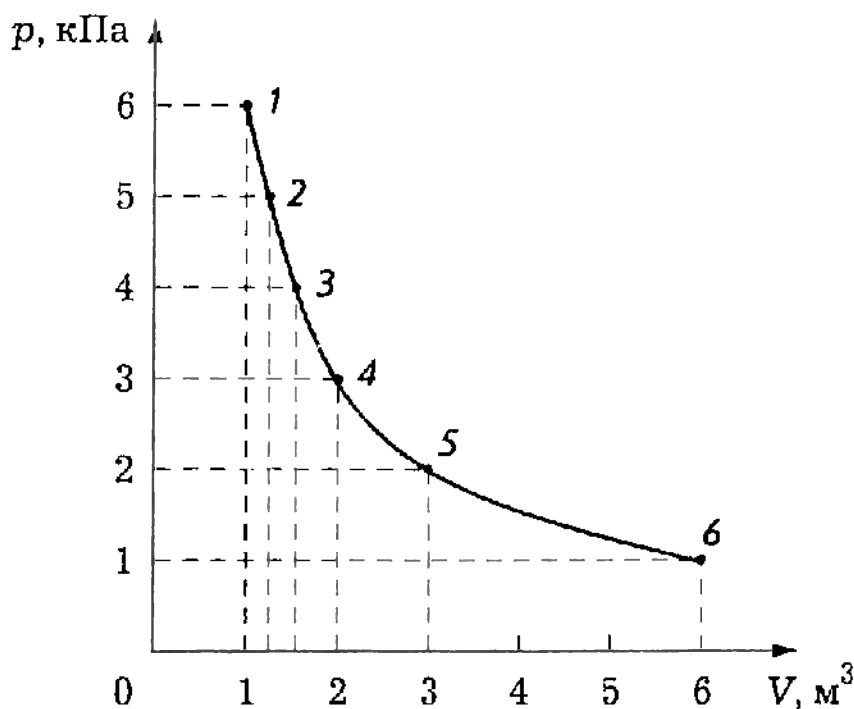


Рис. 70

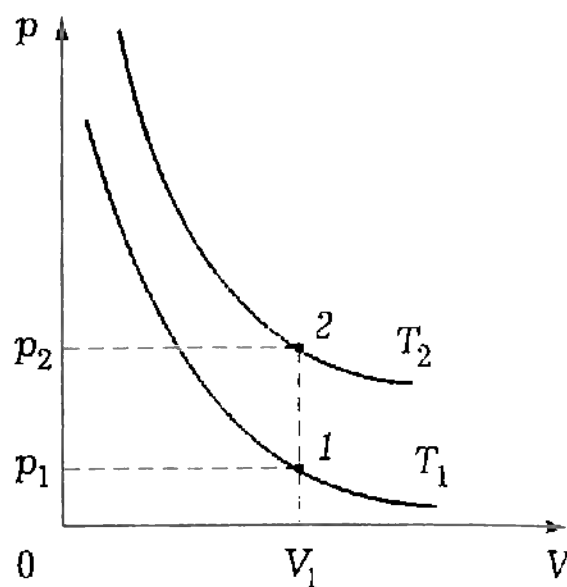


Рис. 71

По найденным значениям p и V нанесем в координатных осях в выбранном нами масштабе точки, через которые пройдет гипербола, изображающая изотерму (рис. 70).

5. На рисунке 71 изображены гиперболы двух изотермических процессов, происходящих при различных температурах T_1 и T_2 в одном и том же идеальном газе. Масса газа в обоих случаях одинакова. Какая из гипербол относится к процессу с более высокой температурой?

Решение. На обеих изотермах легко найти точки, соответствующие одному и тому же объему газа, например V_1 . Для этого проведем изохору, которая пересечет изотермы в точках 1 и 2.

Из уравнения состояния газа для точек 1 и 2 следует:

$$p_1 V_1 = \frac{m}{M} R T_1 \quad \text{и} \quad p_2 V_1 = \frac{m}{M} R T_2,$$

откуда $\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$. Так как $p_2 > p_1$, то $T_2 > T_1$.

Значит, выше расположена изотерма, соответствующая более высокой температуре.

■ УПРАЖНЕНИЕ 14

1. Газ находится в сосуде с подвижным поршнем. Масса газа постоянна. Газ сжали до вдвое меньшего объема. Как изменилось его давление, если температура газа при сжатии не изменилась?

2. Найдите число молекул в идеальном газе объемом 1 м^3 при температуре $273,15 \text{ К}$ и давлении 10^5 Па .

3. В сосуде вместимостью 1 м^3 находится газ при температуре 423 К . Каким станет давление газа, если понизить его температуру до -20°С ? Первоначальное давление газа 10^5 Па .

4. В сосуде с подвижным поршнем находится газ при атмосферном давлении (10^5 Па). Масса газа постоянна. С помощью поршня газ сжали до вдвое меньшего объема. Одновременно его нагрели от 27°С до 600 К . Каким стало его давление?

5. При температуре 100°C газ занимает объем 200 см^3 . Какой объем он занимает при температуре 0°C при том же давлении?
6. В баллоне вместимостью 12 л находится кислород под давлением 10^7 Па при температуре 27°C . Найдите массу газа в баллоне и его плотность.
7. Какой объем занимает идеальный газ при температуре 0°C и давлении 10^6 Па ? Количество идеального газа 1 моль .
8. Вычислите массу атмосферного воздуха, окружающего земной шар, полагая, что ускорение свободного падения равно $9,8\text{ м/с}^2$ и давление на поверхности Земли равно 10^5 Па . Радиус Земли считать равным 6400 км .
9. По графику изотермического процесса (см. рис. 70) постройте графики этого же процесса в координатных осях (p, T) и (V, T) , если известно, что он происходил при температуре $T = 300\text{ К}$.
10. На рисунке 72 показаны графики изотермических процессов, происходящих при одинаковой температуре T , в двух идеальных газах, имеющих одинаковую массу m , но различные молярные массы M_1 и M_2 . Какая из гипербол относится к газу с большей молярной массой?
11. Идеальный газ с постоянной массой испытывает сначала изобарное нагревание, а затем после изотермического сжатия и изохорного охлаждения возвращается в исходное состояние. Изобразите эти процессы в виде графиков с координатами p, V и p, T .

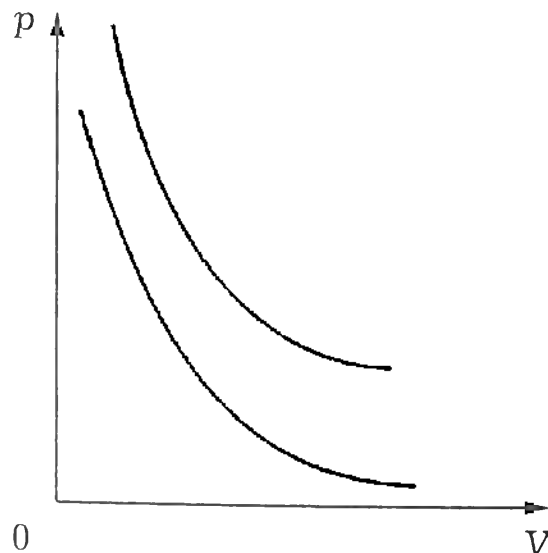


Рис. 72

§ 40 Скорость теплового движения молекул

Кинетическая теория идеального газа основана на том, что газ состоит из беспорядочно движущихся частиц — молекул. Но с какой скоростью они движутся? Теперь мы можем ответить на этот вопрос.

Ранее уже указывалось, что молекулы движутся с различными по модулю и по направлению скоростями. Поэтому речь должна идти о какой-то средней по модулю скорости. Среднее арифметическое значение скорости молекул можно рассчитать, но вычисление это очень сложное, и мы его приводить не будем. Легче рассчитать среднее значение *квадрата* скорости. Оно тоже позволит нам судить о быстроте движения молекул.

Принятое нами определение температуры связывает ее со средней кинетической энергией хаотических движений молекул:

$$\frac{m_0 \overline{v^2}}{2} = \frac{3}{2} kT. \quad (1)$$

Из формулы (1) сразу получается выражение для среднего значения квадрата скорости:

$$\overline{v^2} = \frac{3kT}{m_0}.$$

Отсюда

$$\sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}. \quad (2)$$

Корень квадратный из $\overline{v^2}$ не равен средней скорости¹. Величину $\sqrt{\overline{v^2}}$ называют *средней квадратичной* скоростью. Обозначим ее через v^* .

Так как $N_A k = R$ и $m_0 N_A = M$, формулу (2) можно переписать в виде

$$v^1 = \sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}. \quad (3)$$

При данной температуре средняя квадратичная скорость v^* зависит только от молярной массы M , или, что то же самое, от относительной молекулярной массы M_r газа. Таким образом, если два различных газа находятся при одной и той же температуре, то средние кинетические энергии молекул этих газов одинаковы, но не одинаковы их скорости.

Вычислим, пользуясь формулой (3), среднюю квадратичную скорость молекул кислорода (O_2) при комнатной температуре ($T = 300$ К). Для кислорода $M_r = 32$, так что $M = 32 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

$$v^* = \sqrt{\frac{3 \cdot 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \cdot 3 \cdot 10^2 \text{ К}}{32 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}}} \approx 480 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Как видно, скорости у молекул велики. Особенно велика скорость молекул легких газов. Скорость молекул водорода, например, при комнатной температуре достигает значения около 2 км/с.

Точный расчет показывает, что средняя скорость молекул очень мало отличается от средней квадратичной скорости.

Скорость движения молекул физики сумели не только вычислить, но и измерить. Было поставлено много различных опытов для измерения скорости молекул. Схема одного из них показана на рисунке 73.

В сосуде 1, из которого откачан воздух, находится нагреваемый печью тигель 2 с расплавленным висмутом. Над расплавленным металлом находится пар этого металла, т. е. газ. Молекулы в нем движутся беспорядочно, поэтому в нем есть и такие, которые движутся по направлению к щели 3 в перегородке, отделяющей ту часть сосуда, где расположена печь. За щелью 3 расположены еще две щели, которые «вырезают» пучок частиц, движущихся строго го-

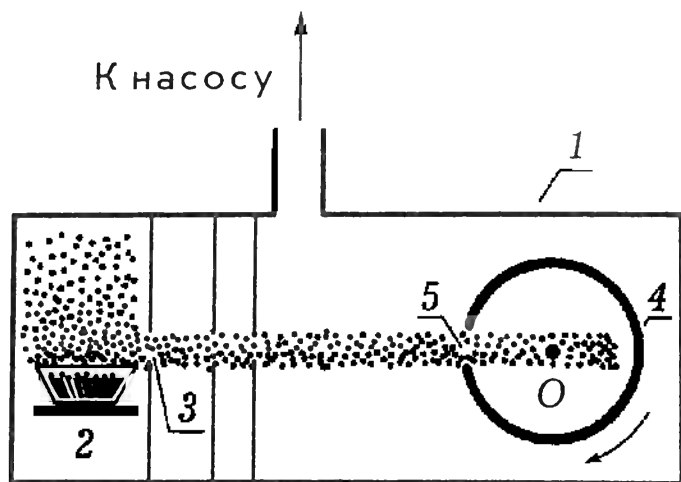


Рис. 73

ризонгально. Пучок этот движется по направлению к цилиндру 4, в котором по образующей вырезана прорезь 5. Частицы долетают до задней стенки цилиндра, оседают на ней, образуя видимую метку — изображение прорези. Опыт повторяется при вращающемся вокруг оси O цилиндра. Теперь частицы пучка будут попадать внутрь цилиндра только в те моменты, когда прорезь в цилиндре находится против щели 3. Эти частицы долета-

¹ Мы получили бы среднюю скорость $\overline{v}$, если бы в формулу (2) входил квадрат среднего значения скорости, т. е. $(\overline{v})^2$, а не $\overline{v^2}$.

ют до задней стенки цилиндра и оседают на ней, но не в том месте, где они оседали прежде, потому что за время полета молекул до задней стенки цилиндр **поворачивается** на некоторый угол и новая метка оказывается смещенной относительно прежней. По смещению метки, зная радиус цилиндра и скорость его вращения, можно определить скорость движения частиц висмута. **Измерения** такого рода полностью подтвердили правильность формулы (2).

Метка, образованная молекулами, осевшими при вращении цилиндра, размыта и значительно шире, чем ширина прорези 5. Это объясняется тем, что в пучке имеются частицы с различными скоростями: ведь медленным частицам требуется больше времени для полета вдоль диаметра цилиндра, а за это время цилиндр повернется на больший угол.

■ ВОПРОСЫ

1. Что такое средняя квадратичная скорость молекул? 2. Атмосферный воздух — это смесь нескольких газов. Одинаковы ли скорости хаотических движений молекул этих газов? 3. Почему инженеры, проектирующие ракетные двигатели, стремятся к тому, чтобы температура выбрасываемых газов была как можно более высокой? 4. От чего зависит скорость тепловых движений молекул?

Самое важное в девятой главе

Согласно кинетической теории идеального газа, давление газа — следствие ударов молекул о стенки сосуда, в который он заключен. Законы механики с учетом хаотичности молекулярных движений позволяют вычислить давление газа:

$$p = \frac{2}{3} n \frac{m_0 \overline{v^2}}{2}, \quad (1)$$

где n — число молекул в единице объема, $\frac{m_0 \overline{v^2}}{2}$ — средняя кинетическая энергия хаотических движений молекул.

Со средней кинетической энергией молекул связана абсолютная температура газа:

$$\frac{m_0 \overline{v^2}}{2} = \frac{3}{2} kT, \quad (2)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана. Величина $\frac{3}{2} k$ связывает единицу температуры кельвин и единицу энергии джоуль.

Из соотношений (1) и (2) получается уравнение состояния идеального газа:

$$pV = NkT, \text{ или } pV = \nu RT, \text{ или } pV = \frac{m}{M} RT.$$

Уравнение состояния газа в любой из этих форм позволяет решать любые задачи, относящиеся к процессам, происходящим в газе.

Уравнение (2) позволяет вычислить среднюю квадратичную скорость молекул $\sqrt{\overline{v^2}}$, близкую по значению к средней скорости $\bar{v}$. Опыт подтверждает результат вычислений.

Жидкость и пар

Пар — это газ, образующийся над поверхностью жидкости при ее испарении. Явление же испарения состоит в том, что часть молекул жидкости покидает ее, срывается с ее поверхности. Эти-то покинувшие жидкость молекулы и образуют над ней пар, ничем не отличающийся от газа. Получается, что при испарении происходит переход вещества из жидкого состояния в газообразное.

Испарение играет важную роль в природе, технике, быту. В грандиозных масштабах мы наблюдаем испарение воды с поверхностей водных пространств Земли. Достаточно сказать, что в среднем ежегодно с поверхности Земли испаряется около пятисот тысяч миллиардов тонн воды.

§ 41 Испарение жидкости и конденсация пара

Почему молекулы жидкости могут ее покидать? Ведь жидкость — это не идеальный газ, где молекулы не взаимодействуют! Между молекулами жидкости действуют значительные силы притяжения. Если молекула улетает с поверхности, она, следовательно, движется против этой силы, а сама сила совершает отрицательную работу. Эту работу называют *работой выхода* молекулы из жидкости. Ясно, что покинуть жидкость могут только те молекулы, у которых кинетическая энергия больше, чем работа выхода. Средняя кинетическая энергия молекул жидкости меньше работы выхода, иначе жидкость не могла бы существовать. Но при любой температуре в жидкости имеется некоторая часть молекул, кинетическая энергия которых больше работы выхода. Эти-то самые быстрые молекулы и вылетают из нее. Существованием таких молекул и объясняется испарение жидкости¹. Доля молекул, кинетическая энергия которых превышает работу выхода, зависит *только* от температуры. Поэтому и число вылетающих из жидкости молекул с поверхности заданной площади за определенный промежуток времени зависит только от температуры.

Жидкость, испаряясь, охлаждается. Если при испарении жидкости из нее вылетают самые быстрые молекулы, то средняя кинетическая энергия оставшихся молекул должна уменьшиться, а температура жидкости понизиться. Опыт это подтверждает. Каждый, вероятно, ощущал резкое охлаждение кожи, смоченной легко испаряющейся жидкостью — эфиром, спиртом.

Охлаждение жидкости при испарении широко используется в технике. На этом явлении основано действие бытовых и промышленных холодильников. Чтобы возвращающаяся на Землю часть космического корабля (спускаемый аппарат) не перегревалась от трения при прохождении через атмосферу, ее покрывают специальным быстро испаряющимся веществом.

¹ Испарение происходит и с твердых тел. В этом случае явление называется *сублимацией* или возгонкой.

При испарении оно охлаждается и охлаждает аппарат, спасая его от перегрева.

Жидкость, испаряясь, может и не охлаждаться. Казалось бы, жидкость, непрерывно испаряясь, должна непрерывно и охлаждаться. Между тем известно, что, например, вода, налитая в стакан, испаряется, но температура ее остается равной температуре окружающего воздуха.

Нетрудно объяснить это постоянство температуры при испарении. К воде в стакане непрерывно подводится теплота из окружающей среды, которая поступает в воду, как только ее температура начинает понижаться. Она-то и не дает воде остывать при испарении. В приведенном выше примере с охлаждением кожи, смоченной эфиром, охлаждение происходит потому, что жидкость испаряется быстро и организм не успевает подводить к коже достаточное количество теплоты.

Таким образом, для того чтобы испарение жидкости происходило при постоянной температуре (изотермически), к ней нужно подводить теплоту и тем в большем количестве, чем больше жидкости переходит в пар.

Теплота испарения. Из курса физики VIII класса известно, что количество теплоты, которое нужно подвести к жидкости, чтобы при постоянной температуре испарить жидкость массой 1 кг, называется *удельной теплотой испарения* («парообразования»).

Обозначим удельную теплоту испарения буквой r , а массу испаряющейся жидкости через m , тогда количество теплоты Q , которое нужно подвести к жидкости для ее испарения, будет равно:

$$Q = rm.$$

Удельная теплота испарения жидкости зависит от температуры. С повышением температуры она уменьшается. У разных жидкостей она различна. Особенно большим значением r отличается вода. При 0°C удельная теплота испарения воды равна $2,5 \cdot 10^6$ Дж/кг, при 100°C она равна $2,2 \cdot 10^6$ Дж/кг.

Удельная теплота парообразования воды (да и других жидкостей) очень велика — более 2 млн джоулей на килограмм! Нетрудно понять почему.

При превращении жидкости в пар (газ) молекулы удаляются друг от друга. Но ведь в жидкости молекулы взаимно притягиваются. Поэтому при удалении их друг от друга увеличивается потенциальная энергия взаимодействия. Вспомним, что, например, при удалении какого-нибудь тела от Земли увеличивается потенциальная энергия взаимодействия системы тело — Земля и для этого должна быть совершена работа, затрачена энергия какого-то другого тела. Теплота парообразования — это и есть энергия, необходимая для удаления молекул друг от друга, для преодоления сил притяжения между ними. По теплоте парообразования того или иного вещества можно судить об энергии взаимодействия между его молекулами. В этом смысле вода среди обычных жидкостей является чемпионом.

Молекулы возвращаются в жидкость (конденсация пара). Вылетевшие из жидкости молекулы образуют над ней пар. Молекулы пара, как и всякого газа, совершают **беспорядочные тепловые движения**. Поэтому какая-то часть их движется в сторону жидкости, из которой они вылетели. Те молекулы, которые попали на поверхность жидкости, втягиваются в нее силами притяжения со стороны молекул на поверхности и снова стано-

вятся молекулами жидкости. Таким образом, одновременно с испарением жидкости происходит и обратный процесс — возвращение молекул пара в жидкость. Это явление называется *конденсацией* пара. Конденсация — это *переход вещества из газообразного в жидкое состояние*.

Число конденсирующихся молекул зависит от того, сколько молекул пара попадает на поверхность жидкости. В § 35 мы видели, что число молекул, попадающих на какую-нибудь площадку, тем больше, чем больше число молекул в единице объема, т. е. чем больше n . Этой же величине пропорционально и давление. Отсюда следует, что число конденсирующихся за определенный промежуток времени молекул тем больше, чем больше давление пара над жидкостью.

Теплота конденсации. Если испарение жидкости сопровождается ее охлаждением, то конденсация пара, наоборот, приводит к ее нагреванию. Молекулы пара, двигаясь к поверхности жидкости, ускоряются силами притяжения. При этом их кинетическая энергия растет как раз на столько, на сколько она уменьшилась при вылете из жидкости. Поэтому удельная теплота конденсации равна удельной теплоте испарения. Для воды, например, она равна $2,2 \cdot 10^6$ Дж/кг. Этим объясняются особенно тяжелые ожоги от горячего пара, более тяжелые, чем от воды такой же температуры (кипятка).

Равенство теплот испарения и конденсации установлено, конечно, опытом. Но оно следует и из закона сохранения энергии. Если бы эти теплоты не были равны, то можно было бы построить машину, в которой какая-нибудь жидкость сначала испаряется, а затем образовавшийся пар конденсируется. Разность теплот испарения и конденсации составила бы прирост энергии замкнутой системы жидкость — пар, что по закону сохранения энергии невозможно.

■ ВОПРОСЫ

1. Почему молекулы жидкости могут вылетать из нее? 2. Как влияет испарение жидкости на ее температуру? 3. Что такое удельная теплота испарения? В каких единицах она выражается? 4. Как влияет конденсация пара на температуру жидкости? 5. Что такое удельная теплота конденсации? В каких единицах она выражается?

§ 42 Насыщенный пар и его свойства

В предыдущем параграфе мы рассмотрели процесс испарения жидкости в *открытом* сосуде. Пар над жидкостью частично конденсируется, частично смешивается с атмосферным воздухом, но пара над жидкостью может и вовсе не быть, если его удаляют. Если к жидкости подводится энергия извне, то в конце концов жидкость полностью испаряется.

Жидкость и пар в закрытом сосуде. Иное дело, если жидкость находится в *закрытом* сосуде. Покинувшие жидкость молекулы остаются в этом случае в пространстве над жидкостью, накапливаются там все в большем числе, и давление пара растет.

Напомним, что число молекул, покидающих за некоторый промежуток времени жидкость, зависит только от температуры и при постоянной температуре постоянно. Число же конденсирующихся за то же время молекул пропорционально давлению пара. А оно по мере испарения жидкости растет. Поэтому накопление пара над жидкостью непременно приведет к то-

му, что число конденсирующихся молекул станет равным числу молекул, покидающих жидкость. После этого ни количество жидкости в сосуде, ни количество пара над ней изменяться не будут, хотя и вылет молекул из жидкости, и их возвращение в жидкость не прекращаются. Устанавливается, как говорят, динамическое равновесие жидкости и пара.

Насыщенный пар. Пар, находящийся в равновесии со своей жидкостью, называется *насыщенным*. В этом названии отражена мысль о том, что при данной температуре давление достигло максимального значения и большим стать не может. Давление насыщенного пара — это максимальное давление, какое может иметь пар при данной температуре.

Пар и газ. Мы уже отмечали, что пар по своим свойствам не отличается от газа. Это относится и к насыщенному пару. В частности, для насыщенного пара справедливо уравнение состояния идеального газа — уравнение Менделеева — Клапейрона.

Но насыщенный пар обладает свойством, которое на первый взгляд кажется необычным и которое как будто бы отличает его от газа. Это свойство состоит в том, что при постоянной температуре давление насыщенного пара не зависит от занимаемого им объема. В этом убеждает следующий опыт.

Стеклянный сосуд плотно закрыт пробкой, через которую пропущена трубка 1 с двумя кранами 2 и 3 и воронкой 4. Трубкой 5 сосуд соединен с манометром 6 (рис. 74).

Сначала откачаем из сосуда воздух через кран 2 при закрытом кране 3. В воронку 4 нальем жидкость (лучше всего эфир). Закроем кран 2 и, осторожно открывая кран 3, по каплям будем вводить в сосуд жидкость.

Первая капля испарится, в сосуде появится пар, и манометр покажет его давление. Испарится, быть может, и еще несколько капель, которые мы последовательно введем в сосуд. Манометр покажет, как при этом растет давление пара. Но пар этот ненасыщенный: жидкости, с которой насыщенный пар должен находиться в равновесии, в сосуде еще нет. Наконец, какая-то очередная капля, введенная в сосуд, не испарится и останется в сосуде жидкой. Теперь пар в сосуде насыщенный, и манометр покажет его давление.

Будем продолжать наливать жидкость в сосуд. При этом мы уменьшаем объем, занимаемый паром. Но мы увидим, что давление пара остается таким, каким оно было после первой неиспарившейся капли (если бы в сосуде находился не пар, а воздух, то его давление при уменьшении объема росло бы по закону $p = \frac{\nu RT}{V}$).

Объясняется это необычное свойство насыщенного пара именно тем, что число конденсирующихся молекул при постоянной температуре про-

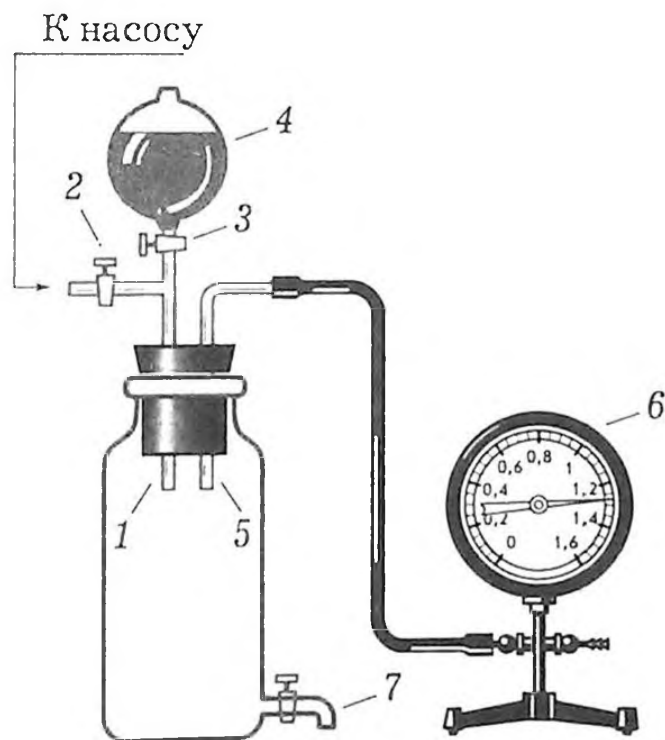


Рис. 74

порционально давлению, а число молекул, вылетающих из жидкости, остается постоянным. При уменьшении объема (когда мы постепенно заполняем сосуд жидкостью) давление пара в первый момент возрастает, но сразу же увеличивается число конденсирующихся молекул. Из-за этого число молекул пара уменьшится и восстановится прежнее давление. Если бы мы, наоборот, увеличивали объем пара (в нашем опыте это можно сделать, выливая жидкость из сосуда через кран 7), то в первый момент это привело бы к уменьшению давления, но тотчас же уменьшилось бы число конденсирующихся молекул. Тогда число вылетающих из жидкости молекул (оно при изменении объема не изменяется) превысило бы число конденсирующихся и опять давление осталось бы прежним.

Все дело в том, что, изменяя объем пара, мы одновременно изменяем число молекул в нем. То же самое происходило бы и с любым газом, если бы, изменяя его объем, мы вместе с тем изменяли бы и число молекул газа. Это следует из уравнения состояния идеального газа $pV = NkT$, если записать его в виде

$$p = \frac{NkT}{V}.$$

Ясно, что давление p не изменится, если изменяются N и V в равное число раз. Именно это автоматически происходит, когда изменяется объем, занимаемый насыщенным паром при постоянной температуре.

Давление насыщенного пара при данной температуре разных веществ различно. Например, давление насыщенного пара воды при 45°C равно 9500 Па, а ртути при той же температуре всего 1,3 Па. Но у всех веществ давление насыщенного пара при постоянной температуре не зависит от объема.

Давление насыщенного пара зависит от температуры. При данной температуре давление насыщенного пара не зависит от объема. Зато при постоянном объеме давление насыщенного пара очень сильно зависит от температуры. Эта зависимость отличается от известной нам линейной зависимости давления газа от температуры.

Найти из опыта эту зависимость нетрудно. Для этого нужно закрытый сосуд с жидкостью, соединенный с манометром, поместить в нагреватель и измерять давление пара при разных температурах. На рисунке 75, а, б приведены графики зависимости давления насыщенного пара воды от температуры в интервале от 0 до 50°C и от 50 до 100°C . Для сравнения на рисунке 75, б пунктиром показан график зависимости давления от температуры для идеального газа. Видно, что при изменении температуры от 50 до 100°C давление насыщенного пара увеличивается более чем в 7 раз. Давление же газа возрастает лишь на 12%.

В чем причина столь сильного различия? Причина та же: при изменении температуры изменяется число молекул в паре. Как следует из теории (этот вывод подтверждается опытом), при повышении температуры резко (не по закону прямой пропорциональности) возрастает доля молекул жидкости, у которых кинетическая энергия больше работы выхода молекул. Поэтому резко возрастает число молекул, переходящих из жидкости в пар. А из уравнения следует, что если число молекул пара N быстро возрастает, а объем V остается постоянным, то и давление будет столь же быстро расти с температурой. Это и отражают графики рисунка 75.

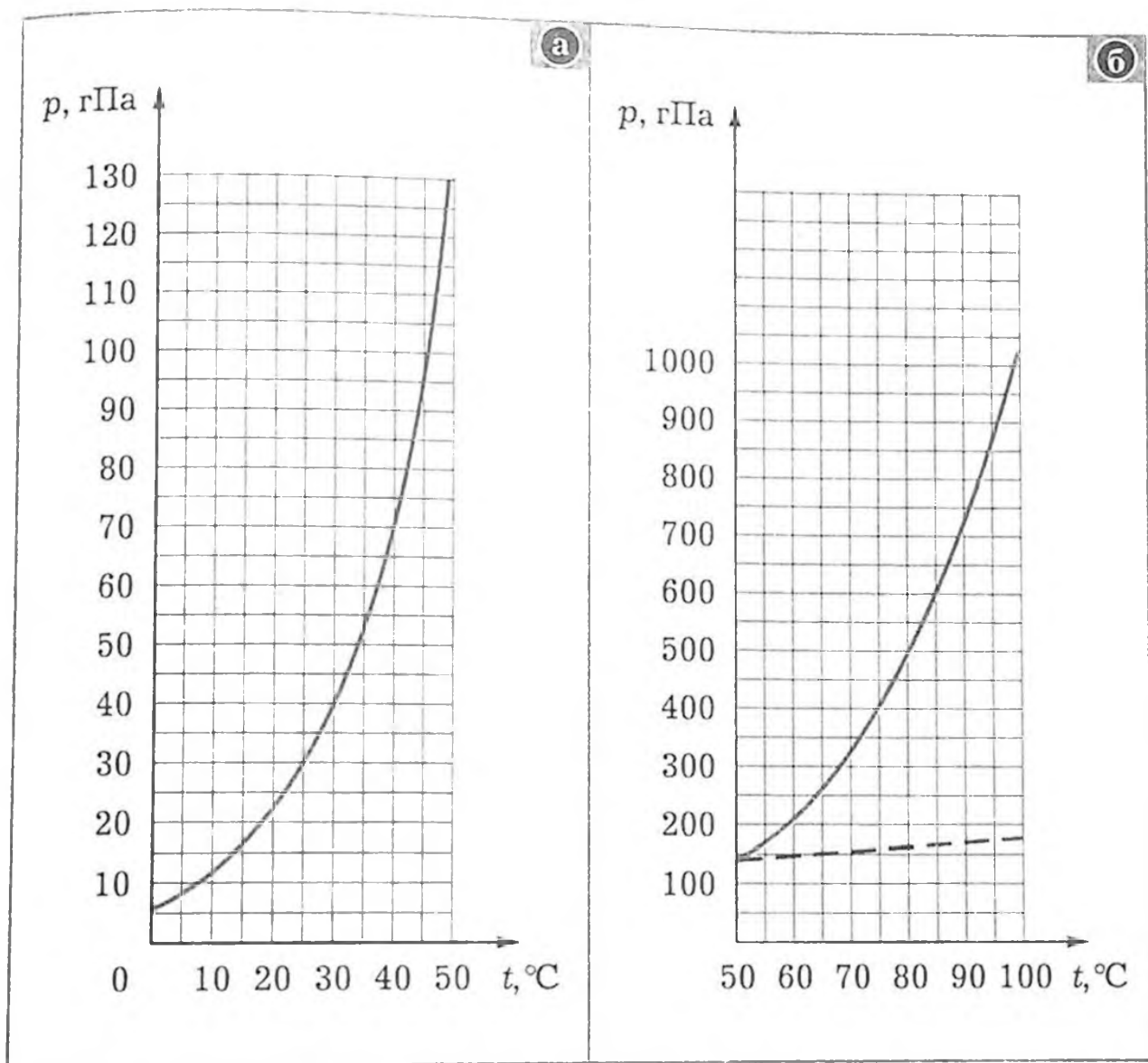


Рис. 75

Давление пара растет, конечно, и потому, что растет температура. Но главную роль играет увеличение с температурой числа вылетающих из жидкости молекул.

Ненасыщенный пар может стать насыщенным. Точка росы. В закрытом сосуде, в котором есть хотя бы немного жидкости, пар над ней насыщенный. Но, вообще говоря, пар может быть и ненасыщенным. Таков, например, пар в сосуде (см. рис. 74) после первых, полностью испарившихся капель.

Но ненасыщенный пар может быть превращен в насыщенный, если понизить его температуру. Это видно и из графика рисунка 75. Если, например, давление водяного пара при температуре 50 °C равно 50 гПа, то он не насыщен. При этой температуре давление насыщенного пара должно быть равно 123 гПа. Но тот же пар (с давлением 50 гПа) станет насыщенным, если его охладить до 33 °C. Это легко можно было бы заметить по каплям воды, которые в виде росы появились бы на стенках сосуда. Температура, при которой ненасыщенный пар становится насыщенным, называется *точкой росы*. Это относится не только к парам воды, но и к парам любой жидкости, хотя росой называют капельки воды, образующиеся при конденсации пара на какой-нибудь поверхности.

■ ВОПРОСЫ

1. Что такое насыщенный пар? При каких условиях он образуется? 2. Можно ли увеличить давление насыщенного пара, сжимая его при постоянной температуре? Что будет происходить при сжатии пара? при его расширении? 3. Почему давление насыщенного пара не зависит от его объема? 4. Как зависит давление насыщенного пара от температуры? В чем причина различия между температурной зависимостью давления насыщенного пара и идеального газа? 5. Как превратить ненасыщенный пар в насыщенный? 6. Что такое точка росы?

■ УПРАЖНЕНИЕ 15

1. В сосуд с подвижным поршнем, поднятым так, что объем под ним равен 2 л, вводится вода массой 1 г, которая полностью испаряется. Затем движением поршня пар сжимается, и, когда объем становится равным 1,5 л, на стенках сосуда появляются первые капельки воды. Был ли пар до сжатия насыщенным? Какова плотность насыщенного пара? 2. В запаянном сосуде вода массой 0,5 кг нагрета до температуры 80 °С. Найдите давление водяного пара в сосуде, если его объем равен 2 м³. Давление насыщенного пара при температуре 80 °С равно 480 гПа (см. график на рис. 75, б).

Имеется ли в сосуде вода? Каким было бы давление пара, если бы вместимость сосуда была равна 1 м³?

§ 43 Влажность атмосферного воздуха

Большая часть поверхности Земли покрыта водой. Казалось бы, водяной пар над Землей должен быть всегда насыщенным. Этого нельзя было бы не заметить: в такой атмосфере ничего бы не высыхало. В действительности водяной пар в атмосфере бывает насыщенным очень редко и лишь в отдельных местах. Объясняется это тем, что для существования насыщенного пара необходимо равновесие между паром и жидкостью, однако этого равновесия по многим причинам нет. Тем не менее водяной пар всегда в атмосфере есть, и его присутствие играет важную роль в жизни растений, животных, людей. В зависимости от того, много или мало водяного пара в воздухе, мы называем воздух более или менее влажным. О влажности воздуха, т. е. о состоянии водяного пара в атмосфере, ежедневно сообщают в сводке погоды.

Влажность воздуха. Обычно водяной пар, содержащийся в атмосфере, ненасыщенный. Но он существует в атмосфере и вносит свой вклад в общее атмосферное давление. Давление водяного пара — это так называемое *парциальное* давление, которое создал бы водяной пар, если бы не было других составных частей атмосферы — азота, кислорода и т. д. Если пар ненасыщенный, то его давление меньше, чем давление насыщенного пара воды при температуре атмосферы. А большим оно быть не может. Но чем ближе парциальное давление водяного пара к давлению насыщенного пара, тем более влажен воздух.

Поэтому состояние водяного пара в атмосфере характеризуют *относительной влажностью*. Так называется величина, равная отношению давления водяного пара в воздухе к давлению насыщенного пара воды при температуре атмосферы. Обозначают относительную влажность буквой φ :

$$\varphi = \frac{p}{p_{\text{н}}},$$

(1)

где p — давление водяного пара в воздухе, p_n — давление насыщенного пара при той же температуре. Значения p_n приводятся в таблицах. По этим таблицам и построены графики на рисунке 75.

При данном значении давления водяного пара в воздухе относительная влажность с понижением температуры возрастает, так как чем ниже температура воздуха, тем водяной пар ближе к насыщению. А при температуре, равной точке росы, пар в воздухе становится насыщенным и начинает конденсироваться. Возникает туман, выпадает роса, твердые поверхности (например, стекла окон) мутнеют, запотевают. По наблюдению запотевания металлической поверхности определяют точку росы. А зная точку росы, можно определить давление p пара в атмосфере: ведь при точке росы пар стал насыщенным, поэтому его давление можно найти по графику на рисунке 75.

Относительную влажность измеряют с помощью прибора, называемого *психрометром*. Он состоит из двух одинаковых термометров (рис. 76). Ртутный баллон одного из них обернут куском ткани, край которой опущен в воду. Вода со смоченной ткани испаряется и охлаждается. Поэтому этот термометр показывает более низкую температуру, чем его сухой сосед. Если бы водяной пар в воздухе был насыщенным, то вода с ткани не испарялась бы и оба термометра давали бы одинаковые показания. Но чем больше пар в воздухе отличается от насыщенного, тем больше разность показаний обоих термометров. По этой разности с помощью специальных психрометрических таблиц находят относительную влажность воздуха.

Влажность воздуха имеет большое гигиеническое значение для человека, так как от нее зависит теплообмен организма с окружающей средой. При температурах 20—25 °С наиболее благоприятна относительная влажность около 50%. При более высоких температурах (например, в горячих цехах заводов) предпочтительнее влажность около 20%.

Влажность играет важную роль для климата на Земле. От нее зависит образование туманов, облаков, осадков и т. д.

■ ВОПРОСЫ

1. Почему в атмосферном воздухе содержатся водяные пары? 2. Что такое относительная влажность воздуха? 3. Какое явление наблюдается при температуре, равной (и ниже) точке росы?

■ ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Каково давление p водяного пара в воздухе при температуре 30 °С, если относительная влажность воздуха 85%?

Решение. Из формулы (1) следует, что $p = \varphi p_n$. По графику рисунка 75 находим, что при 30 °С давление насыщенного пара воды равно 42 гПа. Следовательно, $p = 0,85 \cdot 4,2 \text{ кПа} = 3,57 \text{ кПа}$. Ответ показывает, что «вклад» водяного пара в общее атмосферное давление (около 100 кПа) даже при высокой влажности невелик.

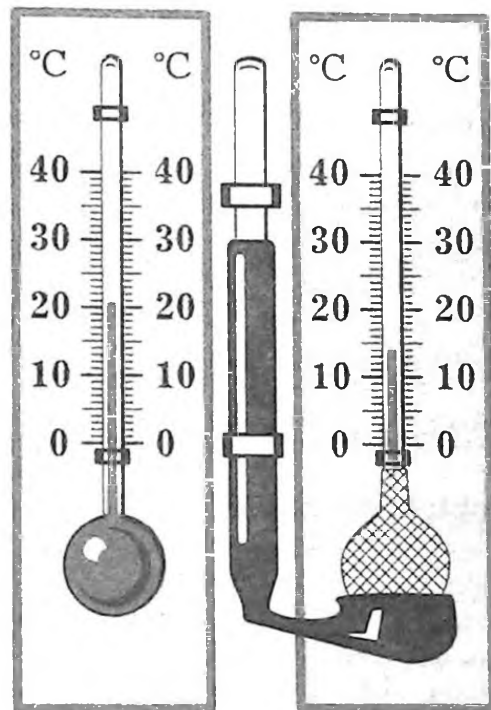


Рис. 76

■ УПРАЖНЕНИЕ 16

1. Сухой термометр психрометра показывает, что температура воздуха равна 25°C . По разности показаний термометров определено, что относительная влажность воздуха равна 60%. Найдите давление водяного пара в воздухе. Чему равна точка росы?
2. Вечером температура воздуха была 15°C , а относительная влажность — 60%. Ночью температура упала до 8°C . Выпала ли роса?
3. В утренние часы температура воздуха была 12°C , а относительная влажность воздуха — 80%. Затем температура повысилась до 20°C . Какова относительная влажность при этой температуре?

§ 44 Кипение жидкости

С явлением кипения жидкости все хорошо знакомы. Оно состоит в том, что при определенной температуре, называемой температурой кипения, всплывают и лопаются многочисленные пузырьки пара, вызывая характерное бурление. Опыт показывает, что *температура кипения* — это температура, при которой давление насыщенного пара жидкости равно внешнему давлению над жидкостью.

Откуда в жидкости берутся пузырьки? Почему их сначала как будто бы нет? Почему существует связь между кипением жидкости и давлением ее насыщенного пара?

Дело в том, что в жидкости всегда присутствуют растворенные газы, которые выделяются в виде пузырьков на дне и стенках сосуда, а также на взвешенных в жидкостях пылинках.

Чем заполнены пузырьки? Внутри пузырьков находится не только воздух. Ведь каждый пузырек — это своеобразный сосуд, стенками которого служит поверхность окружающей его жидкости (рис. 77). С этих стенок жидкость испаряется внутрь пузырьков, так что они заполнены не только воздухом, но и паром жидкости. А так как пузырек — это *закрытый* сосуд, то пар в нем насыщенный. С повышением температуры давление насыщенного пара растет быстрее, чем газа. Поэтому в достаточно нагретой

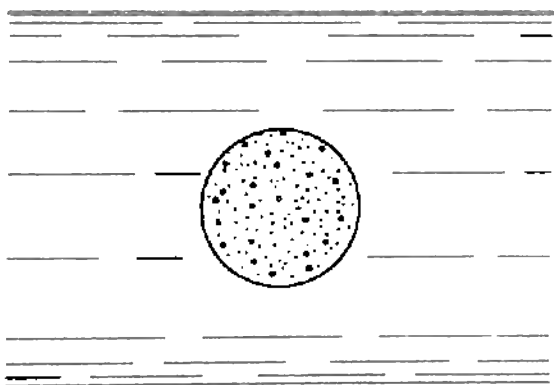


Рис. 77

жидкости давление внутри пузырьков можно считать равным давлению насыщенного пара.

Снаружи на пузырьки действует внешнее давление, например давление атмосферного воздуха, и давление столба жидкости над пузырьками. Но если сосуд не слишком глубокий, то главную роль играет внешнее давление. На пузырьки действует также архимедова сила, сообщая пузырькам плавучесть, поскольку плотность пара меньше плотности жидкости.

Температура кипения. По мере повышения температуры жидкости растет давление насыщенного пара в пузырьках, увеличивается поэтому их объем, а значит, и архимедова сила. В конце концов архимедова сила становится достаточной для того, чтобы пузырьки стали отрываться от стенок и всплывать. Пока верхние слои жидкости имеют более низкую температуру, в них происходит конденсация пара в пузырьках. Вследствие уменьше-

ния давления пузырьки хлопают, издавая характерный звук. После прогрева жидкости пузырьки с паром достигают ее поверхности и пар из них вырывается наружу.

Таким образом, кипение отличается от обычного испарения тем, что к испарению со свободной поверхности жидкости добавляется испарение с поверхностей, образующих стенки пузырьков внутри жидкости. Всплывая, пузырьки «транспортируют» содержащийся в них пар все к той же свободной поверхности жидкости.

Но для того чтобы пузырьки пара могли расти, давление насыщенного пара, которым они заполнены, должно быть чуть выше внешнего давления на жидкость. Вот почему температура кипения равна температуре, при которой давление насыщенного пара в пузырьках равно внешнему давлению (точнее, немного выше). Если внешнее давление — это нормальное атмосферное давление, т. е. 10^5 Па, то вода должна кипеть при 100°C . Из графика рисунка 75 видно, что именно при 100°C давление насыщенного пара воды равно 10^5 Па.

Температур кипения у жидкости много! Внешнее давление на жидкость может быть и не равным атмосферному давлению. На вершинах высоких гор, где атмосферное давление меньше обычного, жидкость кипит при меньших, чем внизу, температурах. На высоте 5—6 тыс. м (вершина Эльбруса) вода кипит при температуре около 80°C .

Если искусственно понижать давление над жидкостью, она будет кипеть при любой температуре, вплоть до температуры замерзания. Из графика рисунка 75, а видно, что, например, при комнатной температуре (25°C) давление насыщенного пара воды равно 32 гПа. И если понизить давление над жидкостью до этого значения (с помощью насоса), вода станет кипеть при комнатной температуре. А при внешнем давлении 6 гПа вода закипит при 0°C и замерзнет. Мы видим, таким образом, что графики рисунка 75 — это в то же время и графики зависимости температуры кипения от внешнего давления. На рисунке 78 представлен именно такой график. Он является как бы зеркальным изображением графика рисунка 75, а, повернутым на 90° .

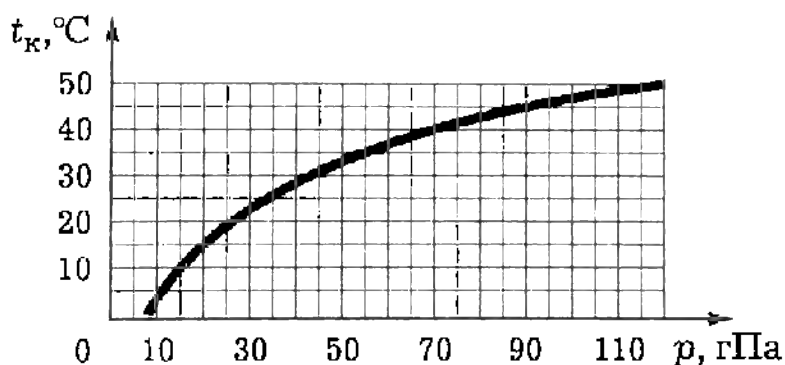


Рис. 78

Закипев, жидкость не нагревается. Известно, что температура кипящей жидкости в процессе кипения не повышается, несмотря на то что к ней непрерывно подводится энергия от нагревателя. Значит, вся подводимая энергия тратится на испарение жидкости и ничего не расходуется на повышение ее температуры. Объясняется это тем, что чем большее количество теплоты подводится, тем больше пузырьков всплывает и лопается, тем более интенсивно происходит процесс испарения (напомним, что при испарении жидкость охлаждается). Благодаря этому температура кипящей жидкости автоматически поддерживается постоянной. Именно поэтому температура кипящей при атмосферном давлении воды и была использована при построении температурной шкалы (шкалы Цельсия).

Перегретая жидкость. Явление кипения жидкости связано с тем, что в жидкости и на стенках сосуда имеется газ, образующий пузырьки. Не будь в жидкости растворенного газа и мельчайших взвешенных частиц, не было бы и кипения.

Опыт показывает, что тщательно очищенные жидкости можно перегреть на десятки градусов без закипания. Воду, например, после такой операции можно нагреть и до $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, но она не закипит. Такая жидкость, нагретая до температуры выше ее нормальной температуры кипения, но не кипящая, называется *перегретой* жидкостью. В промышленных установках (например, в паровых котлах) такой перегрев очень опасен, потому что если в перегретой жидкости по какой-либо причине окажется источник газа, то немедленно начнется бурное кипение взрывного характера.

Еще один случай, когда жидкость не кипит. Не может жидкость кипеть и в том случае, когда она заключена в герметически закрытый сосуд и температура во всех его частях одинакова. Действительно, над жидкостью в таком сосуде находится насыщенный пар (сосуд закрыт!). Поэтому давление внутри пузырьков в точности равно давлению над жидкостью, а для того, чтобы пузырьки всплывали, нужно, чтобы давление в пузырьках было хотя бы немного выше внешнего.

Заметим в заключение, что пар, как всякий газ, практически невидим. Каждый, однако, видел, как из носика чайника с кипящей водой вырываются, как принято говорить, клубы пара. Но то, что мы видим, — это не пар, а туман, т. е. маленькие капли воды, которые появились при конденсации пара на мельчайших твердых частицах, всегда имеющих в воздухе.

■ ВОПРОСЫ

1. В чем состоит явление кипения? При каких условиях жидкость закипает? 2. Как температура кипения жидкости связана с давлением ее насыщенного пара? 3. Может ли вода кипеть при температуре ниже $100\text{ }^{\circ}\text{C}$? выше $100\text{ }^{\circ}\text{C}$? 4. Почему температура кипящей при данном внешнем давлении жидкости остается постоянной?

■ УПРАЖНЕНИЕ 17

1. Воду объемом 2 л в открытом сосуде нагрели на электрической плитке от $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до кипения, при этом испарилась $1/5$ часть жидкости. Какое количество теплоты потрачено на нагревание и испарение? Удельная теплоемкость воды равна $4200\text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$, а удельная теплота испарения воды при $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ равна $2,2 \cdot 10^6\text{ Дж/кг}$.

2. Какое количество теплоты надо затратить, чтобы воду массой 10 кг с начальной температурой $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ нагреть в открытом сосуде до кипения и обратить в пар?

Самое важное в десятой главе

С поверхности жидкости при любой температуре происходит испарение, т. е. вылет молекул. Обусловлено оно тем, что в жидкости всегда существуют молекулы, кинетическая энергия которых больше работы выхода молекул.

Испарение жидкости сопровождается ее охлаждением. Чтобы превратить жидкость в пар без изменения ее температуры, жидкости нужно сообщить определенное количество теплоты. Удельная теплота парообразования — характерная для данной жидкости величина.

Происходит и явление, обратное парообразованию, — конденсация пара. При этом определенное количество теплоты выделяется. Удельная теплота конденсации равна удельной теплоте парообразования.

Если жидкость находится в закрытом сосуде, то устанавливается равновесие жидкости и пара над ней. Пар в этом случае называется насыщенным. Давление насыщенного пара — это максимальное давление, какое пар может иметь при данной температуре. Давление насыщенного пара не зависит от его объема. При постоянном объеме давление насыщенного пара быстро растет с температурой. Давление насыщенного пара при данной температуре — характерная для данного вещества величина.

Кипение — это процесс перехода жидкости в пар, происходящий с образованием пузырьков, заполненных паром. Так как пузырьки заполнены насыщенным паром, то кипение, т. е. массовое всплытие пузырьков, происходит при температуре, при которой давление насыщенного пара жидкости равно внешнему давлению. Если изменяется внешнее давление, то изменяется и температура кипения жидкости.

глава 11 Свойства жидкостей

Газ и жидкость

В предыдущих главах были рассмотрены свойства вещества в газообразном состоянии. В этой главе мы познакомимся с некоторыми свойствами жидкости.

Выше мы видели, что газ способен превращаться в жидкость (конденсация), а жидкость — в газ (парообразование). Вообще любой газ может быть превращен в жидкость (или, как говорят, сжижен), так же как всякая жидкость может испариться, превратиться в газ.

Каковы же особенности жидкого состояния? Чем оно отличается от газообразного?

Мы уже упоминали, что плотность вещества в жидком состоянии в сотни раз больше, чем в газообразном. Это значит, что в жидкости расстояния между молекулами очень малы, молекулы «упакованы» почти вплотную одна к другой. Однако нельзя думать, что газ — это просто сильно сжатый газ. Оказывается, что газ можно сжатием превратить в жидкость только в том случае; если его температура ниже так называемой *критической* температуры, различной у разных веществ. У воды, например, критическая температура равна 374°C (647 K). Выше критической температуры вещество жидким быть не может, как бы ни увеличивать давление.

При малых расстояниях между молекулами жидкости важнейшую роль играют силы взаимодействия между ними. Вычислить эти силы — задача *очень* трудная, и она до сих пор не решена. Поэтому еще не удалось получить уравнение состояния жид-

кости, подобное уравнению состояния идеального газа. Но многие свойства жидкости хорошо изучены экспериментально.

Молекулы жидкости, как и молекулы газа, совершают непрерывные беспорядочные движения. Средняя кинетическая энергия поступательных движений молекул определяет температуру жидкости. Хотя «свобода» этих движений ограничена силами взаимодействия между молекулами, молекулы все же могут перемещаться из одного места в другое. Поэтому жидкость обладает свойством текучести.

Молекулярные движения позволяют различным жидкостям смешиваться (явление диффузии). Однако это смешивание происходит много медленнее, чем перемешивание газов.

При нагревании жидкости, как и газы, расширяются, но в меньшей степени. Благодаря малому расстоянию между молекулами жидкость почти не сжимается. Чтобы объем жидкости уменьшился на 1%, давление должно увеличиться в сотни и даже в тысячи раз. Это и понятно: при попытке уменьшения расстояния между молекулами резко возрастают силы отталкивания между ними, а они препятствуют сжатию.

Все эти различия между жидкостью и газом носят в основном количественный характер. Но большое различие в плотности жидкости и газа приводит и к качественному их различию.

Наиболее характерная особенность, отличающая жидкость от газа, состоит в том, что жидкость сохраняет свой объем, а на границе с газом или паром образует свободную поверхность. Именно поэтому мы можем налить полстакана чая, держать в колбе воду, занимающую не весь объем. Газы же всегда занимают весь предоставленный им объем.

В следующих параграфах будут рассмотрены явления, связанные с существованием у жидкости свободной поверхности, — так называемые *поверхностные явления*.

§ 45 Поверхностная энергия

Свойства поверхности жидкости. 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.

Вы, 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 его поверхность будет меньше суммы поверх-

ностей обоих шариков. Выходит, что в описанных явлениях мы наблюдали самопроизвольное сокращение поверхности жидкости: жидкость принимала форму, при которой площадь ее поверхности оказывалась минимальной.

Значит, свойства поверхности жидкости отличаются от свойств остальной ее части.

Молекулы на поверхности и внутри жидкости. Как можно объяснить самопроизвольное сокращение поверхности жидкости?

Все дело в том, что молекулы на поверхности и в глубине жидкости находятся в разных условиях. На каждую молекулу внутри жидкости (например, молекулу 1) действуют силы притяжения со стороны соседних молекул, окружающих ее со всех сторон (рис. 79). Результирующая этих сил равна нулю. Над поверхностью жидкости находится пар, плотность которого во много раз меньше, и взаимодействием его молекул с молекулами жидкости можно пренебречь. Молекулы, находящиеся на поверхности (например, молекула 2), притягиваются только молекулами, находящимися внутри жидкости (см. рис. 79). Под действием этих сил молекулы поверхностного слоя втягиваются внутрь, число молекул на поверхности уменьшается и площадь поверхности жидкости сокращается. Но все молекулы, разумеется, не могут с поверхности уйти внутрь жидкости. Этому препятствуют силы отталкивания, которые начинают действовать при уменьшении расстояний между молекулами, втягиваемыми внутрь, и молекулами, находящимися под поверхностью. При определенных расстояниях между ними силы взаимодействия становятся равными нулю. Процесс сокращения поверхности прекращается, и на поверхности остается такое число молекул, при котором ее площадь оказывается минимальной для данного объема жидкости.

Нечто похожее наблюдается, когда, например, толпа людей проявляет интерес к событию, происходящему в ее центре (рис. 80, а). Все люди

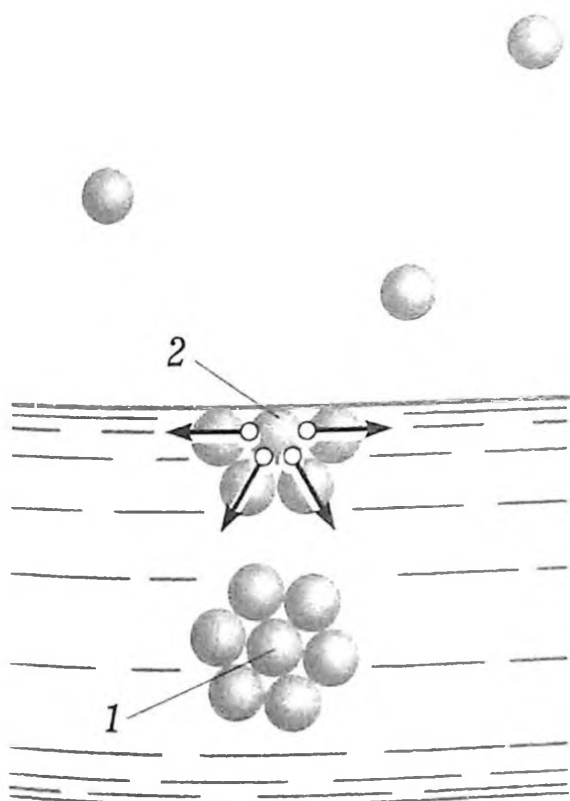


Рис. 79

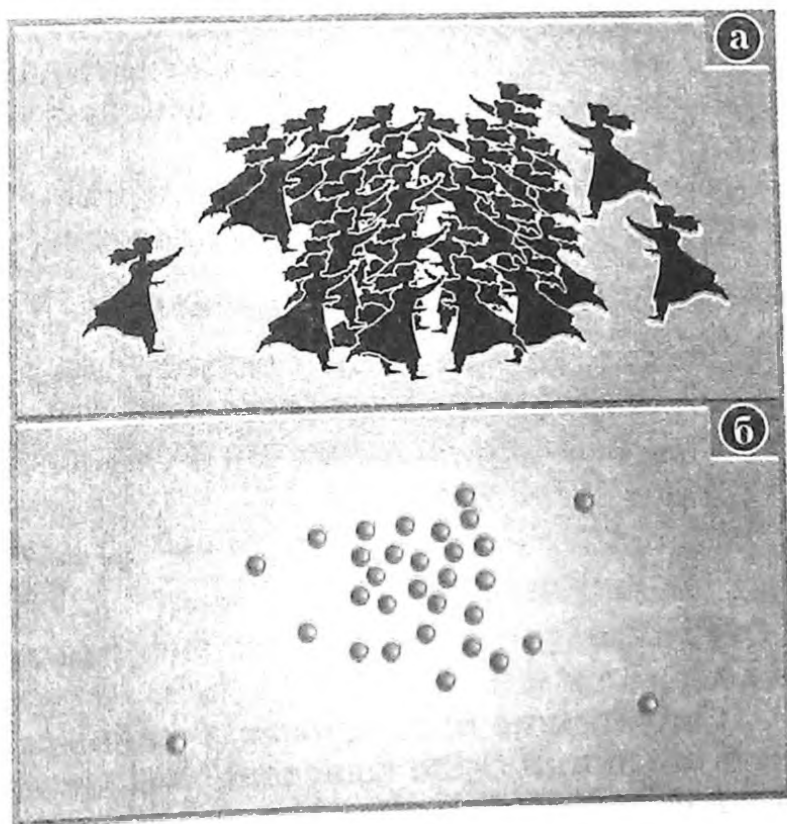


Рис. 80

стремятся занять положение, наиболее близкое к месту события, и число людей на периферии толпы уменьшается.

Глядя на такую толпу сверху, можно видеть, что она образует фигуру, близкую к кругу (рис. 80, б), т. е. фигуру с наименьшим периметром. Так же и капли жидкости принимают форму, близкую к шаровой, при которой их поверхность минимальна.

При увеличении поверхности жидкости происходит обратное: часть молекул из внутренних слоев жидкости переходит на поверхность. При таком переходе совершается работа против сил взаимодействия этих молекул с молекулами поверхности жидкости.

Работа сил взаимодействия между молекулами и потенциальная энергия молекул. Из механики (IX класс) известно, что работа силы, действующей на тело, равна изменению его потенциальной энергии, взятому с противоположным знаком: $A = -(W_{p2} - W_{p1})$, или $A = -\Delta W_p$.

Это относится и к работе сил взаимодействия между молекулами. При переходе молекул из глубины жидкости на поверхность преодолевается отталкивание этих молекул молекулами поверхности. Поэтому работа этих сил отрицательна ($A < 0$), а изменение потенциальной энергии молекул положительно ($\Delta W_p > 0$), т. е. $W_{p2} > W_{p1}$. Отсюда следует, что молекулы, образующие поверхность жидкости, обладают избыточной потенциальной энергией по сравнению с молекулами внутри жидкости.

Чем больше поверхность жидкости, тем большее число молекул обладает избыточной потенциальной энергией. Поэтому избыточную потенциальную энергию, которой обладают молекулы на поверхности жидкости, называют *поверхностной энергией*.

Увеличение поверхности жидкости может происходить различными способами, например при раздроблении жидкости на мелкие капли, растекании ее по поверхности твердого тела и т. д. При этом увеличение потенциальной энергии молекул, переходящих изнутри жидкости на поверхность, происходит за счет уменьшения их кинетической энергии. Поэтому если не происходит притока некоторого количества теплоты из окружающей среды, то увеличение поверхности жидкости приводит к охлаждению жидкости.

Отношение поверхностной энергии участка поверхности к площади этого участка называется *удельной поверхностной энергией*. Эту величину обозначают греческой буквой σ (сигма): $\sigma = \frac{W_p}{S}$, где W_p — поверхностная энергия.

Из сказанного выше следует, что для определения удельной поверхностной энергии нужно вычислить отношение работы A , совершаемой при изотермическом увеличении поверхности жидкости, к приращению площади этой поверхности ΔS :

$$\sigma = \frac{A}{\Delta S}.$$

Удельная поверхностная энергия в СИ выражается в джоулях на квадратный метр (Дж/м²).

Сокращение поверхности и минимум поверхностной энергии. При изучении механики было выяснено важное положение о том, что между потенциальной энергией системы и ее равновесием существует определенная связь: в состоянии устойчивого равновесия потенциальная энергия минимальна.

Это положение имеет и более широкий смысл — оно относится и к поверхностной энергии, которой обладают поверхности жидких тел: для них также характерно, что устойчивое равновесие наступает при минимуме поверхностной энергии. Значит, сокращение поверхности жидкости — это самопроизвольный процесс, ведущий к состоянию устойчивого равновесия.

Поверхностная энергия уменьшается также, если поверхность жидкости покрывается веществом, поверхностная энергия которого меньше, чем у данной жидкости (его называют *поверхностно-активным*). Если такое вещество растворить в воде (например, мыло), то его молекулы концентрируются на поверхности воды, покрывая ее плотным слоем. Так, при малой концентрации мыла в воде (до 5%) на поверхности воды адсорбируется до 95% молекул мыла.

■ ВОПРОСЫ

1. Чем отличаются состояния молекул на поверхности и внутри жидкости? 2. Почему свободная поверхность жидкости сокращается? 3. В чем состоит процесс сокращения поверхности? увеличения поверхности? 4. Что такое поверхностная энергия? удельная поверхностная энергия?

§ 46 Поверхностное натяжение

Удельную поверхностную энергию σ часто называют *поверхностным натяжением*. Почему? Это станет ясно из изложенного ниже.

Удельная поверхностная энергия и сила, действующая вдоль поверхности жидкости. Из определения σ следует, что для измерения этой величины нужно измерить работу, необходимую для увеличения поверхности жидкости на единицу площади при постоянной температуре.

Для вычисления этой работы воспользуемся свойством некоторых жидкостей, например мыльной воды, создавать тонкие пленки. Рассмотрим мыльную пленку, образованную на прямоугольнике с одной подвижной переключиной длиной d (рис. 81, а). Если на эту переключину не действует внешняя сила, поверхность жидкости будет сокращаться и подвижная переключина притянется к неподвижной (рис. 81, б). Площадь поверхности сократится до минимума. Значит, со стороны жидкой пленки вдоль ее поверхности действует сила $\vec{F}$, касательная к поверхности и перпендикулярная участку периметра, ограничивающего поверхность жидкости. Эта сила называется *силой поверхностного натяжения*.

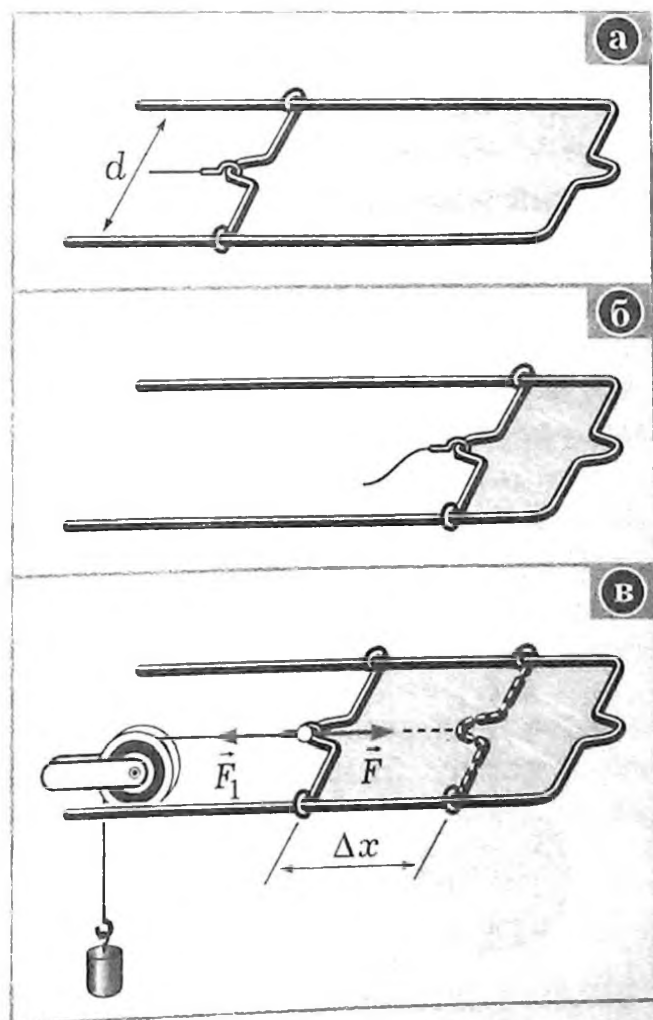


Рис. 81

Пленку можно растянуть (рис. 81, в), если к перекладине приложить внешнюю силу $\vec{F}_1$, равную по модулю силе поверхностного натяжения:

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

Если под действием силы $\vec{F}_1$ подвижная перекладина сместится на Δx , то произведенная работа A_1 будет положительной: $A_1 = F_1 \Delta x$. За счет этой работы поверхность пленки увеличится на ΔS . Сила поверхностного натяжения $\vec{F}$ совершает при этом отрицательную работу: $A = -F \Delta x$.

Так как пленка — это тонкий слой жидкости, ограниченный *двумя* поверхностями, то $\Delta S = \Delta x l$, где $l = 2d$. Поверхностная энергия пленки при этом увеличится на

$$\Delta W_p = \sigma \Delta S = \sigma l \Delta x, \quad (1)$$

где ΔW_p — изменение поверхностной энергии.

Так как $A = -\Delta W_p$, то, подставив в это выражение вместо A и ΔW_p их значения, получим:

$$-F \Delta x = -\sigma l \Delta x.$$

Отсюда

$$\sigma = \frac{F}{l}. \quad (2)$$

Поверхностным натяжением называется физическая величина, равная отношению модуля силы поверхностного натяжения, с которой жидкость действует по касательной к ее поверхности перпендикулярно участку контура, ограничивающего поверхность жидкости, к длине этого участка.

Другими словами, поверхностное натяжение можно рассматривать как силу, действующую на единицу длины контура, ограничивающего поверхность и стремящуюся сократить эту поверхность до минимума.

Наименование единицы удельной поверхностной энергии и поверхностного натяжения: $1 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$.

Из формулы (2) 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 .

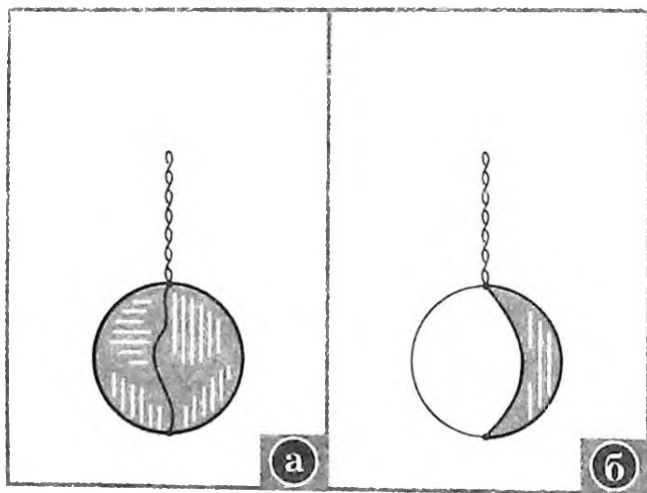


Рис. 82

Поверхностное натяжение может быть выражено в ньютонах на метр, что несколько не противоречит выражению этой величины в джоулях на квадратный метр.

$$\text{Действительно, } 1 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2} = 1 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{м}^2} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{м}}.$$

Опыты, позволяющие изучить особенности силы поверхностного натяжения. Рассмотрим некоторые опыты с жидкими пленками. Возьмем проволочное кольцо. Две его точки соединим ниткой. Опустив кольцо в мыльный раствор, получим пленку, на которой будет лежать нитка (рис. 82, а).

Прорвав пленку с одной стороны от нитки, мы увидим, как другая часть пленки сожмется и натянет нитку (рис. 82, б).

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.

Рассмотренный опыт может создать впечатление, что поверхность жидкости представляет собой реальную натянутую пленку, которую можно снять с жидкости, как кожицу со сливы. На самом деле такой натянутой упругой пленки на поверхности жидкости не существует. Чтобы убедиться в этом, сделаем следующий опыт.

П-образный проволочный каркас подвесим к динамометру. Динамометр покажет значение силы упругости, уравнивающей силу тяжести, действующую на каркас (рис. 83, а).

Поднесем сосуд с мыльной водой к каркасу так, чтобы он полностью в нее погрузился. При медленном опускании сосуда каркас затянется сплошной мыльной пленкой. Мы увидим, что растяжение пружины увеличилось (рис. 83, б). Это значит, что со стороны мыльной пленки на горизонтальную часть каркаса длиной d действует вниз сила, которая вызывает дополнительное растяжение пружины динамометра. Это и есть сила поверхностного натяжения, с которой стремящаяся к сокращению поверхность жидкости тянет за собой проволоку. По модулю эта сила равна силе упругости пружины динамометра.

Если в этом опыте увеличивать площадь пленки, опуская сосуд с мыльным раствором еще ниже, то мы увидим, что показания динамометра не меняются. Это значит, что сила поверхностного натяжения остается постоянной, несмотря на увеличение поверхности. Следовательно, сила поверхностного натяжения не является силой упругости. Этим поверхность жидкости отличается от других, например резиновых, пленок, по мере растяжения которых увеличивается расстояние между молекулами вдоль поверхности и сила упругости возрастает.

Поверхность жидкости не обладает упругостью. Увеличение поверхности жидкости происходит не за счет увеличения расстояний между молекулами поверхности, а за счет перехода новых молекул из глубины на поверхность жидкости.

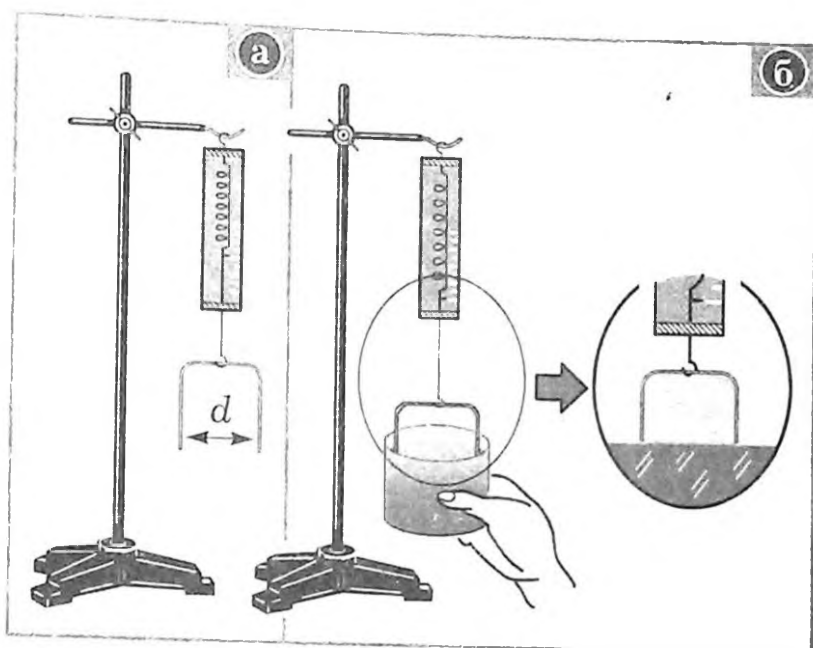


Рис. 83

■ ВОПРОСЫ

1. Что такое поверхностное натяжение?
2. Как можно измерить поверхностное натяжение?
3. Чем отличаются силы поверхностного натяжения от сил упругости?
4. Почему удельную поверхностную энергию часто называют поверхностным натяжением?

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. Давление внутри жидкости отсутствует. Значит, сила тяжести 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.

Жидкость на опоре. Почему же жидкость, налитая в сосуд, всегда принимает форму сосуда? Это объясняется наличием неподвижной опоры, на которой находится жидкость. Как было выяснено при изучении механики,

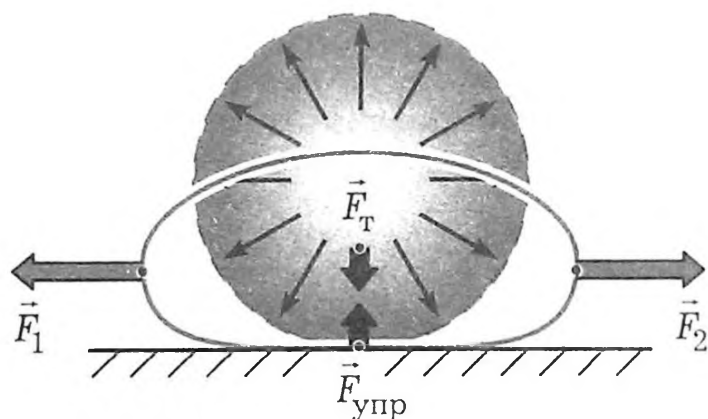


Рис. 84

тело, находящееся на опоре, и сама опора деформируются. Следовательно, на жидкость в сосуде, кроме силы тяжести $\vec{F}_T$, действует сила реакции опоры (рис. 84). Реакция опоры — это сила упругости $\vec{F}_{\text{упр}}$, с которой деформированная опора действует на прилегающий к ней слой жидкости.

Каждый нижний слой жидкости является опорой для вышележащего слоя. Поэтому он действует с силой реакции на вышележащий слой, т. е. создает давление на него. Таким образом, благодаря неподвижной опоре внутри жидкости создается давление (гидростатическое), максимальное у нижнего слоя и убывающее в направлении к верхнему. По закону Паскаля давление в жидкости на данной высоте одинаково во всех ее точках, а значит, по всем направлениям. Силы гидростатического давления $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$, действующие на жидкость в горизонтальном направлении, приводят к ее растеканию. По этой причине жидкость на опоре не имеет сферической формы, а растекается; налитая же в сосуд, она принимает форму этого сосуда.

Растеканию капли жидкости на опоре препятствуют силы, действующие в поверхностных слоях жидкости, которые стремятся сократить площадь поверхности капли.

Если капля маленькая, сила тяжести мала. Мала поэтому и сила реакции опоры, и гидростатическое давление в капле. Значит, малы и силы давления, вызывающие ее растекание. Поэтому мы часто видим, что маленькие капли жидкости, например росы на листьях растений, ртути на стекле, практически сферичны. Сферичны и малые дождевые капли. В то же время большие дождевые капли из-за сопротивления воздуха, играющего роль опоры, слегка сплюснены.

Итак, малые капли жидкости имеют и на опоре форму, близкую к шаровой. Но какого размера каплю можно считать для этого достаточно малой?

Нетрудно приближенно определить размер капли (ее радиус), при котором и на опоре ее форма была бы близка к сферической.

Каков же он, этот радиус? Капля на опоре обладает потенциальной энергией W_1 , зависящей от силы тяжести, и поверхностной энергией W_2 , связанной с молекулярными силами в поверхностных слоях. Равновесие капли на опоре определяется минимумом ее общей потенциальной энергии. Как видно из рисунка 84, потенциальная энергия, связанная с силой тяжести, уменьшается, когда капля сплющивается, так как при этом понижается ее центр тяжести; поверхностная же энергия при этом увеличивается, так как при растекании шаровой капли ее поверхность возрастает. Однако каждый из этих видов энергии при растекании шаровой капли изменяется неодинаково. Оказывается, изменения этих энергий существенно зависят от радиуса капли. Покажем это.

Потенциальная энергия капли $W_1 = mgh = \rho V_{\text{ш}} g r$, где $V_{\text{ш}}$ — объем шара, ρ — плотность жидкости, h — высота центра тяжести капли над опорой, равная r . Так как $V_{\text{ш}} = \frac{4}{3} \pi r^3$, то $W_1 = \frac{4}{3} \pi \rho g r^4$. Поверхностная же энергия W_2 этой капли равна $W_2 = \sigma S_{\text{ш}}$, где $S_{\text{ш}} = 4\pi r^2$. Поэтому $W_2 = 4\pi r^2 \sigma$.

Мы видим, что потенциальная энергия, связанная с силой тяжести, пропорциональна r^4 , а поверхностная энергия пропорциональна r^2 . Поэтому потенциальная энергия W_1 при изменении радиуса капли изменяется значительно быстрее поверхностной энергии W_2 . Например, при уменьшении радиуса капли в 10 раз потенциальная энергия W_1 , связанная с силой тяжести, уменьшается в 10 000 раз, а поверхностная энергия — только в 100 раз.

Растекание капли прекратится, т. е. наступит равновесие, когда сумма обоих видов энергий будет минимальна. Однако, как показал приведенный выше расчет, при достаточно малом радиусе капли вклад потенциальной энергии, связанной с силой тяжести, будет пренебрежимо мал и минимум общей потенциальной энергии капли будет в основном определяться минимумом ее поверхностной энергии. А она, как мы уже установили, минимальна, когда поверхность капли имеет шаровую форму.

Рассчитаем радиус капли — назовем его критериальным (r_k), при котором потенциальная энергия капли много меньше поверхностной энергии.

$W_1 = W_2$, или $\frac{4}{3} \pi \rho g r_k^4 = 4\pi \sigma r_k^2$, откуда

$$r_k = \sqrt{\frac{3\sigma}{\rho g}}.$$

Мы видим, что r_k зависит от свойств самой жидкости (σ , ρ) и от ускорения свободного падения (g) в данном месте.

Рассчитаем значение r_k для капли воды, находящейся на опоре в земных условиях ($g = 9,8 \text{ м/с}^2$), если $\sigma_{\text{H}_2\text{O}} = 7,3 \cdot 10^{-2} \text{ Дж/м}^2$, $\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 10^3 \text{ кг/м}^3$:

$$r_k = \sqrt{\frac{3 \cdot 7,3 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2}}{10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}}} \approx 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м} \approx 1,5 \text{ мм}.$$

При таком радиусе капли ее форма близка к шарообразной.

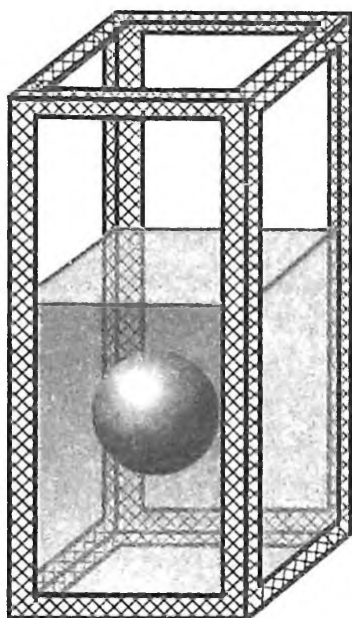


Рис. 85

Опыт Плато. Интересен особый случай, когда шаровую форму принимает жидкость, имеющая достаточно большой объем, хотя она и находится как бы на опоре.

В раствор поваренной соли помещают анилин — жидкость, плотность которой равна плотности раствора. При этом наблюдается интересное явление: анилин плавает в растворе в виде крупной капли шаровой формы (рис. 85). В этом случае гидростатическое давление внутри капли во всех точках поверхности уравновешивается таким же давлением со стороны водного раствора соли. Поэтому такая опора не оказывает влияния на форму жидкости.

■ ВОПРОСЫ

1. Влияет ли сила тяжести на форму капли жидкости при ее свободном падении? Ответ обоснуйте. 2. Какую форму можно считать собственной формой жидкости? 3. Почему сплющиваются большие капли жидкости, попадающие на опору? 4. Какую форму принимает жидкость в условиях невесомости?

■ УПРАЖНЕНИЕ 18

1. Сферическую каплю ртути радиусом 3 мм разделили на две одинаковые капли. Какую работу совершили для увеличения энергии поверхностного слоя? Поверхностное натяжение ртути равно $0,465 \text{ Дж/м}^2$.

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 одной молекулы при комнатной температуре. Поверхностное натяжение воды равно $0,073 \text{ Дж/м}^2$.

3. Две малые капли воды, имеющие одинаковый радиус при соприкосновении сливаются в одну.

Как изменится площадь поверхности образовавшейся капли по сравнению с первоначальной площадью поверхности обеих капель? Почему происходит слияние капель?

4. Капля ртути во время падения имеет форму шара радиусом 5 мм. Падая в вазу, она дробится на 8 примерно одинаковых капель. Вычислите:

а) отношение поверхностной энергии капли к потенциальной энергии в момент ее соприкосновения с опорой;

б) отношение поверхностной энергии одной из образовавшихся малых капель к ее потенциальной энергии.

■ ДОМАШНЕЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ

Налейте в тарелку немного воды и положите на ее поверхность 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.

§ 48

Явления смачивания и несмачивания

Все, очевидно, знают, что даже маленькая капля воды растекается по чистой поверхности стеклянной пластинки, покрывая ее тонким слоем. В то же время капля воды на парафинированной пластинке, как и на поверхности листьев некоторых растений, не растекается, а имеет почти правильную форму шара.

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 стекла. Для лужения железа (покрытия его оловом) протягивают железный лист через ванну с расплавленным оловом. Таким способом изготавливают так называемую белую жечь.

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 пластине, является границей поверхностей трех тел: жидкости (Ж), твердого тела (Т) и газа (Г) (рис. 86, а). 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, вытесняя с него газ, или, наоборот, соберется в каплю, зависит от соотношения величин $\vec{F}_{жт}$, $\vec{F}_{тг}$, $\vec{F}_{жг}$: растекание жидкости по поверхности твердого тела произойдет, если $F_{тг} > F_{жт} + F_{жг} \cos \theta$ (см. рис. 86, 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, и поверхностью твердого тела, называется *краевым углом*. Он всегда отсчитывается внутрь жидкости. Равновесие капли жидкости на границе этих тел устанавливается при условии $F_{тг} = F_{жт} + F_{жг} \cos \theta$, отсюда $\cos \theta = \frac{F_{тг} - F_{жт}}{F_{жг}}$.

Из полученной формулы для $\cos \theta$ легко видеть, что при $F_{тг} > F_{жт}$ $\cos \theta > 0$, т. е. краевой угол острый (см. рис. 86, а), и жидкость смачивает твердое тело; если же $F_{жт} > F_{тг}$, то $\cos \theta < 0$, значит, краевой угол тупой (рис. 86, б) и жидкость не смачивает твердое тело. В этом случае газовая среда вытесняет жидкость с поверхности твердого тела.

При $F_{тг} - F_{жт} > F_{жг}$ равновесие не может установиться, ибо косинус не может быть больше единицы. Это значит, что жидкость полностью смачивает поверхность твердого тела, вытесняя с нее газовую среду.

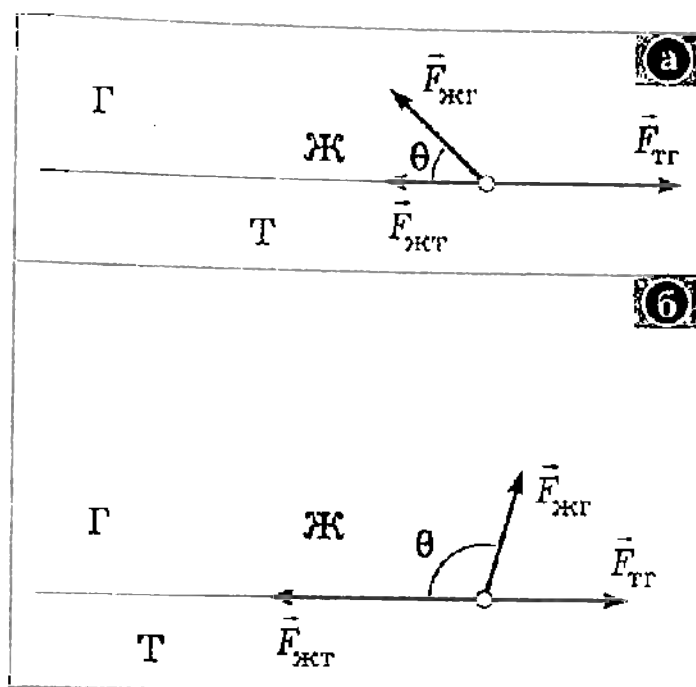


Рис. 86

НИКЕ.

мый флотацией¹.

нии другой — полезного минерала.

ются водой.



Рис. 87

мыть руки. Почему мыльный раствор помогает отмыть загрязнения? Молекулы мыла обладают особым строением, они состоят из «активной» части, сильно взаимодействующей с водой, и углеводородного «хвоста», который с водой взаимодействует слабо.

При отмывании загрязненной поверхности мыльным раствором молекулы мыла концентрируются (адсорбируются) на отмываемой поверхности и оказываются ориентированными активными концами к воде. В этом случае поверхность тела лучше смачивается водой. Вода растекается по поверхности тела, вытесняя с нее частицы грязи.

■ ВОПРОСЫ

1. Чем объясняются явления смачивания и несмачивания? 2. Что называется краевым углом? 3. Какой краевой угол образуют жидкости: а) смачивающие твердое тело; б) не смачивающие твердое тело?

ние».

§ 49 Капиллярные явления

В узких трубках смачивающие и несмачивающие жидкости образуют кривые поверхности — мениски — соответственно с острым (рис. 88, а) или тупым краевым углом (рис. 88, б). Смачивающая жидкость в таких трубках образует вогнутый, а несмачивающая — выпуклый мениск.

Образование мениска у жидкости в узких трубках приводит к некоторым неожиданным явлениям.

Опустим в воду тонкую стеклянную трубку, называемую *капиллярной*¹. Казалось бы (см. учебник физики для VII класса), однородная жидкость и в широком сосуде, и в 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 некоторую высоту h над ее уровнем в широком сосуде (рис. 89, 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. 89, б). Эти явления называются *капиллярными*.

Капиллярные явления весьма распространены. Такие вещества, как керамика, бумага, ткань, дерево, кожа, почва, различные строительные материалы и т. д., имеют в себе множество каналов. Вода и другие смачивающие жидкости, 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 твердое тело вдоль

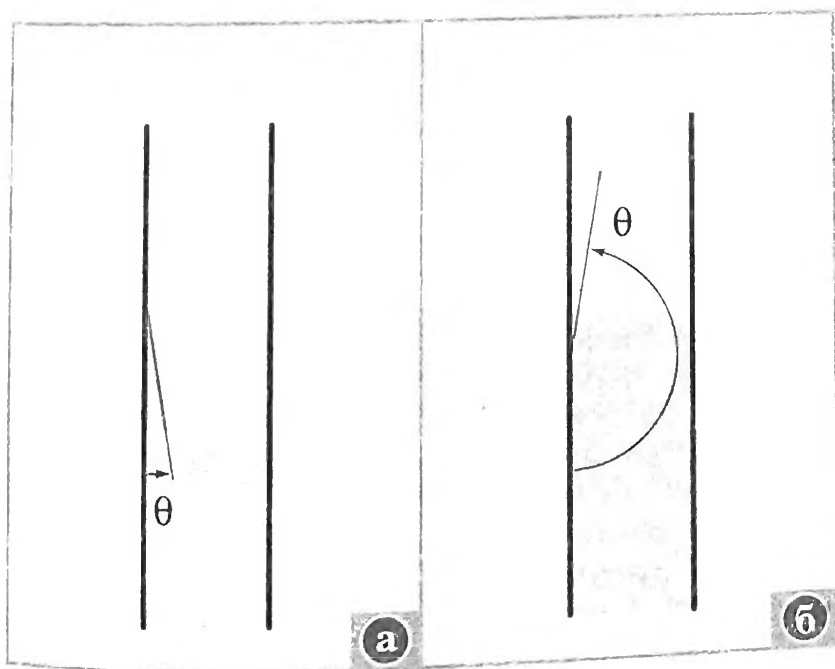


Рис. 88

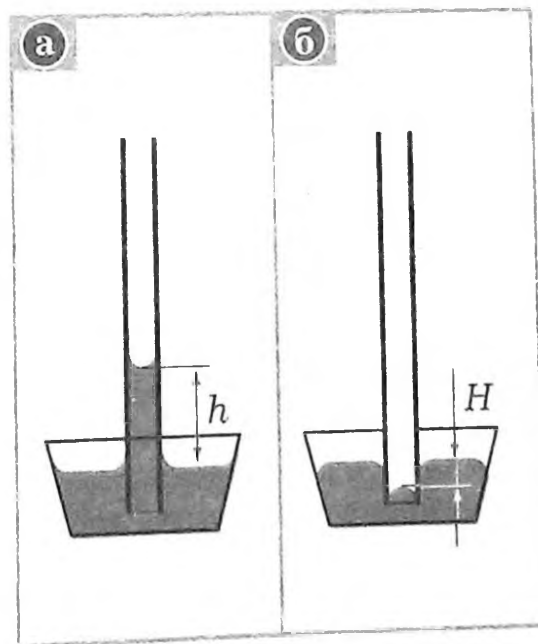


Рис. 89

¹ От латинского слова «капилля» — волос.

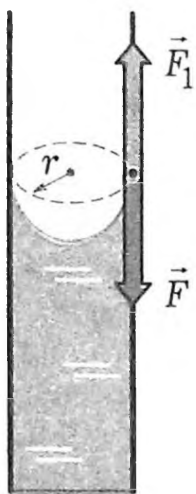


Рис. 90

линии их соприкосновения длиной $2\pi r$ действует направленная вниз сила поверхностного натяжения, модуль которой равен

$$F = 2\pi r\sigma,$$

где r — радиус капилляра (рис. 90). Со стороны твердого тела на жидкость действует такая же по модулю сила $\vec{F}_1$, направленная вверх (третий закон Ньютона). Она и вызывает подъем жидкости в капилляре на такую высоту h (см. рис. 89, а), 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 столба.

Следовательно,

$$\sigma 2\pi r = \pi r^2 h\rho g$$

или

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g r}.$$

Мы видим, что высота подъема жидкости в капилляре тем больше, чем меньше радиус капилляра r . Кроме того, высота подъема зависит от свойств самой жидкости — ее поверхностного натяжения σ и плотности ρ .

Жидкость, не смачивающая стенки капилляра, опускается на расстояние H (см. рис. 89, б), определяемое по той же формуле.

■ ВОПРОСЫ

1. Что такое капилляр? 2. В чем заключаются капиллярные явления? 3. Весной землю пахут и боронуют. Объясните, почему это способствует сохранению влаги в почве.

■ УПРАЖНЕНИЕ 19

1. На какую высоту может подняться вода в капиллярном канале стебля ржи диаметром 0,04 мм?
2. Глицерин поднялся в капиллярной трубке на 20 мм. Определите поверхностное натяжение глицерина, если диаметр канала трубки 1 мм. Плотность глицерина $1,26 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.
3. В стеклянной капиллярной трубке на Земле вода поднимается на 1 см. На какую высоту поднимается вода в той же трубке на Луне? $g_{\text{л}} = 1,6 \text{ м/с}^2$.

■ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

1. Опустите в воду край промокательной бумаги и измерьте, на какую максимальную высоту поднимается вода. Выполнив работу, по высоте подъема воды оцените диаметр капиллярных каналов волокон бумаги.
2. Вычислите максимальное значение диаметра 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.

Самое важное в одиннадцатой главе

В жидкости расстояния между молекулами очень малы, молекулы «упакованы» почти вплотную одна к другой. При малых расстояниях между молекулами важную роль в жидкостях играют силы взаимодействия между ними.

Молекулы жидкости, как и молекулы газа, совершают непрерывные беспорядочные движения. Хотя «свобода» этих движений ограничена силами взаимодействия между молекулами, они все же могут перемещаться из одного места в другое. Поэтому жидкость обладает свойством текучести.

Наиболее характерная особенность, отличающая жидкость от газа, состоит в том, что жидкость сохраняет свой объем, а на границе с газом или паром образует свободную поверхность.

Молекулы, образующие поверхность жидкости, находятся в особом состоянии по сравнению с молекулами внутри жидкости. Над поверхностными молекулами имеются только молекулы пара, слабо взаимодействующие с ними. Со стороны же молекул жидкости, находящихся на глубине, действуют силы, направленные внутрь жидкости, которые значительно превосходят силы притяжения со стороны молекул пара.

С особым состоянием поверхностных молекул связана способность поверхности жидкости к самопроизвольному сокращению (образованию капель, жидких пленок с наименьшей площадью поверхности).

Если на жидкость, кроме молекулярных сил, действует только сила тяжести, как, например, при свободном падении, то жидкость всегда принимает форму шара. Когда жидкость попадает на опору, наряду с силой тяжести на нее действует реакция опоры. Благодаря этому в жидкости возникает гидростатическое давление, которое приводит к ее растеканию. Маленькие капли жидкости, у которых гидростатическое давление мало, на несмачиваемой поверхности сохраняют форму шара.

Поверхностные свойства жидкости характеризуются удельной поверхностной энергией (σ). Удельная поверхностная энергия — это отношение избыточной потенциальной энергии, которой обладают молекулы поверхностного слоя, к площади поверхности:

$\sigma = \frac{W_p}{S}$. Она измеряется работой, которую нужно совершить при постоянной температуре для увеличения поверхности жидкости на единицу площади: $\sigma = \frac{A}{\Delta S}$ (выражается в Дж/м²).

Для характеристики свойств жидкости применяется еще поверхностное натяжение, обозначаемое также буквой σ .

Поверхностное натяжение — это отношение модуля силы, с которой жидкость действует вдоль ее поверхности перпендикулярно участку периметра, ограничивающего поверхность жидкости, к длине этого участка: $\sigma = \frac{F}{l}$ (выражается в Н/м).

На границе жидкости, твердого тела и газа происходят явления смачивания или несмачивания. На линию соприкосновения жидкости, твердого тела и газа действуют силы поверхностного натяжения $\vec{F}_{тг}$, $\vec{F}_{жт}$ и $\vec{F}_{жг}$. При $F_{тг} > F_{жт} + F_{жг} \cos \theta$ происходит растекание жидкости по поверхности твердого тела, т. е. явление смачивания. В этом случае краевой угол θ острый. При $F_{тг} < F_{жт} + F_{жг} \cos \theta$ происходит вытеснение газом жидкости с поверхности твердого тела, т. е. явление несмачивания. При несмачивании угол θ тупой.

Равновесие на границе тел устанавливается при условии

$$F_{тг} = F_{жт} + F_{жг} \cos \theta.$$

Откуда следует: $\cos \theta = \frac{F_{тг} - F_{жт}}{F_{жг}}.$

Эта формула позволяет установить, в каких случаях краевой угол θ острый, тупой или равен нулю, т. е. в каких случаях жидкость не смачивает твердое тело, смачивает его или наступает полное его смачивание.

глава

12

Свойства твердых тел

Жидкость становится твердым телом

В главе 10 мы видели, что газ (пар) может превратиться в жидкость. Хотя мы и не рассматривали способов превращения газа в жидкость, но с одним примером такого превращения мы встретились: насыщенный пар (газ!) превращается в жидкость при его охлаждении ниже точки росы.

Известно, что при дальнейшем охлаждении (теперь уже жидкости) происходит еще одно превращение: жидкость превращается в *твердое тело*.

От жидкости твердое тело видимым образом отличается тем, что оно имеет собственную форму (жидкость принимает форму сосуда, если она не находится в состоянии невесомости). Другая отличительная особенность твердого тела — его прочность. Свойство это состоит в том, что разорвать твердое тело, разрушить его можно только при определенной деформации. Жидкость, а тем более газ, прочностью не обладает.

В этой главе мы узнаем, как молекулярно-кинетическая теория объясняет основные свойства твердого тела и самое его образование.

§ 50

Образование твердого тела.

Понятие о кристаллической структуре

Для того чтобы жидкость превратилась в твердое тело, ее нужно охладить до определенной температуры — *температуры отвердевания*. Так, для превращения воды в лед при атмосферном давлении ее нужно

охладить до 273,15 К (0 °С), ртуть становится твердой при 234 К (−39 °С) и т. д.

Что происходит с веществом при его отвердевании?

Мы знаем, что газ превращается в жидкость, когда его молекулы сближаются настолько, что плотность вещества увеличивается примерно в 1000 раз, а расстояния между молекулами уменьшаются в 10 раз. Соответственно этому в сотни тысяч раз увеличиваются силы взаимодействия между ними.

Быть может, при отвердевании вещества молекулы сближаются еще больше, а силы взаимодействия еще более возрастают? Может быть, к этому и сводится отвердевание? Оказывается, нет. Опыт показывает, что в твердом состоянии плотность вещества очень мало отличается от плотности того же вещества в жидком состоянии. Более того, бывает и так, что плотность в твердом состоянии меньше, чем в жидком. Наиболее известным примером служит вода: плотность воды равна 1000 кг/м³, а льда 917 кг/м³.

В твердом теле положение частиц равновесное. Мы знаем, что каждая молекула жидкости со всех сторон окружена другими молекулами и все они взаимно притягиваются друг к другу. Совершая хаотические движения, молекула оказывается в различных положениях относительно других частиц, на различных расстояниях от них. Но среди этих различных положений есть и такие, в которых частица находится в положении равновесия. Так бывает, когда расстояние между молекулами оказывается равным r_0 (см. § 34). Если молекула со всех сторон окружена другими молекулами и сумма всех сил, действующих на нее, равна нулю, то это и значит, что она находится в состоянии *устойчивого* равновесия. Равновесие бывает устойчивым тогда, когда при малом отклонении тела (в данном случае молекулы) от этого положения возникает сила, возвращающая его в это положение. Устойчивым является, например, положение шарика на дне углубления (рис. 91, а): при отклонении шарика в любую сторону равнодействующая силы тяжести и реакции опоры возвращает шарик в первоначальное равновесное положение (рис. 91, б).

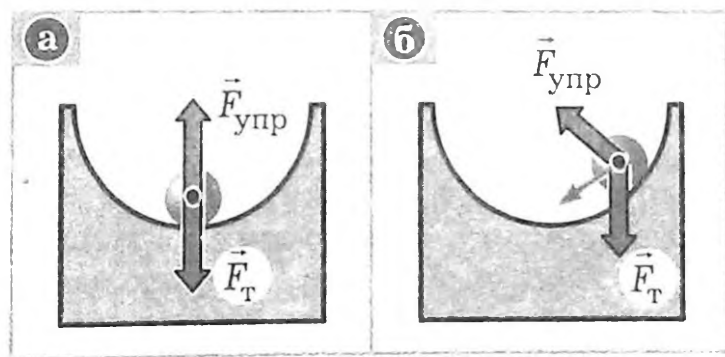


Рис. 91

Напомним, что для положения устойчивого равновесия характерно и то, что потенциальная энергия тела в этом положении *меньше*, чем в любом соседнем положении. Например, потенциальная энергия отклоненного шарика (см. рис. 91, б) равна mgh , где h — высота над дном углубления. Из рисунка видно, что потенциальная энергия шарика минимальна, когда он находится на дне углубления, т. е. в положении устойчивого равновесия.

Молекулы жидкости, совершая свои хаотические движения, непременно должны проходить и положения устойчивого равновесия среди своих соседей. Почему они не задерживаются в них? Объясняется это тем, что кинетическая энергия тепловых движений молекул велика и они как бы проскакивают эти положения. Ведь шарик тоже выскочит из углубления,

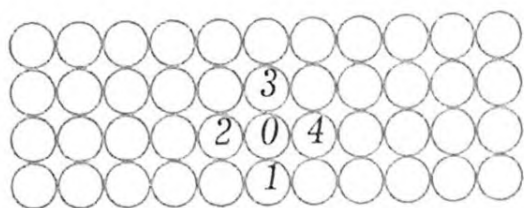


Рис. 92

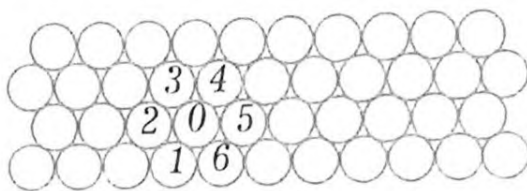


Рис. 93

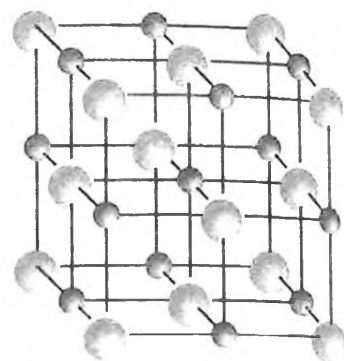


Рис. 94

если он попал туда, имея достаточно большую скорость, а значит, и кинетическую энергию.

Но если в достаточной степени понизить температуру жидкости и тем самым уменьшить кинетическую энергию ее молекул, то они уже не будут проскакивать положения устойчивого равновесия, а расположатся в них. Это и происходит при отвердевании жидкости.

Порядок и беспорядок в твердом теле. Для того чтобы все молекулы находились в состоянии устойчивого равновесия, нужно, чтобы каждая из них была расположена одинаково относительно других частиц. Это значит, что у каждой молекулы должно быть одно и то же число одинаково расположенных соседей. Рисунки 92 и 93 поясняют это. На первом показано такое расположение частиц, при котором у каждой частицы (например, частицы 0) четыре ближайших соседа (1, 2, 3 и 4), на втором — каждая частица имеет шесть ближайших соседей.

Из обоих рисунков следует, что в твердом теле молекулы располагаются в определенном порядке, в то время как в жидкости или в газе такого порядка нет. При отвердевании происходит резкий, скачком, переход от беспорядка к порядку во взаимном расположении частиц. При этом частицы занимают положения, в которых потенциальная энергия минимальна. Покинуть свое место частица может, только получив каким-то образом (например, при столкновении с соседними частицами) достаточную для этого энергию. Вот почему твердые тела и сохраняют свою форму.

О твердых телах, в которых частицы расположены в определенном порядке, говорят, что они имеют *кристаллическую структуру*. Правильно расположенные частицы образуют *кристаллическую решетку*, а места, где в этой решетке расположены частицы, называются *узлами* кристаллической решетки.

На рисунке 94 показана модель части кристаллической структуры каменной соли NaCl. Частицами каменной соли являются не молекулы NaCl и даже не атомы Na и Cl, а положительно заряженные ионы Na и отрицательно заряженные ионы Cl. Они, чередуясь между собой, занимают узлы кристаллической решетки и образуют кристалл каменной соли. Таким образом, кристаллическая структура — главный признак твердого тела.

Тот факт, что в твердом теле каждая частица занимает определенное место в узле кристаллической решетки, не означает, что частицы в твердом теле неподвижны. Как в газе и жидкости, частицы твердого тела совершают непрерывные хаотические движения, а средняя кинетическая энергия этих движений определяет температуру тела. Но тепловые движе-

ния частиц в твердом теле не так свободны, как в газе или даже в жидкости.

На каждую частицу твердого тела действуют силы со стороны всех ее соседей. И эти силы действуют так, как действовали бы маленькие пружинки, помещенные между частицами, так что каждая частица — это как IX класса. Они и движутся так, как движутся **пружинные маятники**: частицы твердого тела совершают малые колебания около **положения** равнозакреплена, а точка, около которой частица колеблется. Так как «пружинки» действуют на частицы со всех сторон, то колебания частиц совершенно беспорядочны, несогласованны. В твердом теле существует порядок в расположении частиц, но нет порядка в их движениях.

■ ВОПРОСЫ

1. В чем различие между взаимным расположением частиц в жидкости и в твердом теле? 2. Как изменяется потенциальная энергия взаимодействия частиц при отвердевании вещества? 3. Что означает выражение «Твердое тело имеет кристаллическую структуру»? Что такое узел кристаллической решетки? 4. Совершают ли частицы твердого тела тепловые движения? Чем эти движения отличаются от тепловых движений частиц в жидкости и в газе?

§ 51

Кристаллы и их свойства. Аморфные тела

Кристаллы не рождаются мгновенно и полностью готовыми. На образование кристалла требуется время даже после того, как температура жидкости достигла нужного значения. Сначала появляется так называемый *зародыш* будущего кристалла. Он может появиться, например, при случайном скоплении небольшого числа частиц жидкости, расположившихся друг относительно друга так, что все они оказались в равновесных положениях. При очень большом числе частиц такие случайные встречи не только возможны, но и неизбежны. После появления этого кристаллика-зародыша он обрастает другими частицами, присоединяющимися к нему ряд за рядом, слой за слоем, с соблюдением того порядка в расположении частиц, который уже существует в зародыше. В конце концов вся жидкость станет твердым телом с одинаковым взаимным расположением частиц. Такое тело, в котором порядок размещения частиц в зародыше распространяется на весь его объем, называется *монокристаллом* («моно» — один).

Кристаллы-многогранники. Существуют монокристаллы, выросшие в самой природе (для этого было достаточно времени — миллионы лет). Таковы широко распространенные шестигранные кристаллы кварца. Реже встречаются кристаллы алмаза, турмалина и др. Все они **имеют характерную форму многогранников**. Эта правильная **огранка монокристаллов** — характерная их особенность. Она отражает **тот факт**, что в правильном порядке расположены сами частицы. Часто встречаются крупные, тоже сами собой родившиеся в природных условиях **кристаллы** каменной соли. Но и крупинцы соли, сахара, соды — это тоже маленькие монокристаллы. Монокристаллы больших размеров получают искусственным путем в лабораториях. Они необязательно имеют правильную форму. Не огранка — главный признак монокристалла, а одинаковый порядок во всем его объеме.

В разных направлениях — разные свойства. Еще одна особенность монокристаллов — их *анизотропия*. Так называется явление, состоящее в том, что некоторые свойства тела различны в разных направлениях. Явление это хорошо знакомо всем, кто имел дело с древесиной, хотя древесина и не кристалл. Известно, что дерево легко раскалывается вдоль волокон, но с большим трудом в направлении, перпендикулярном волокнам. Так же и монокристаллы легче раскалываются в одном направлении, чем в дру-

гих. Различными в разных направлениях могут быть и упругие, электрические и многие другие свойства.

Причина анизотропии та же, что и правильной огранки, — порядок в расположении частиц. На рисунке 95 показано строение кристалла графита, имеющего слоистую структуру. В каждом слое находятся атомы углерода, расположенные в вершинах правильных шестиугольников. Расстояния между слоями примерно в 2 раза больше, чем расстояния между соседними атомами в самом слое, а следовательно, силы взаимодействия между слоями существенно меньше, чем аналогичные силы внутри них. Именно поэтому, когда вы пишете карандашом, слои графита легко отделяются и оставляют след на бумаге.

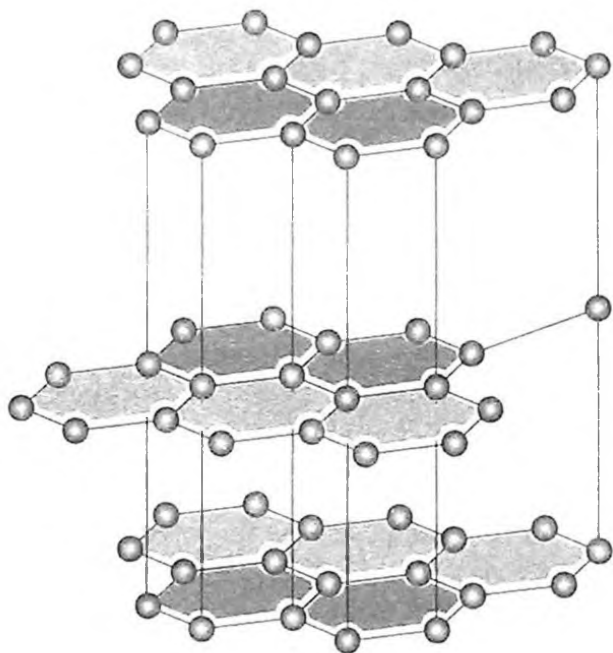


Рис. 95

Поликристаллы. Обычные твердые тела не монокристаллы. Дело в том, что если не созданы специальные условия, то в жидкости при охлаждении возникает не один зародыш, а тысячи и миллионы зародышей. Поэтому при отвердевании вырастает множество очень маленьких кристалликов, и они срастаются между собой. Такие тела называются *поликристаллами* («поли» — много). Металлы, металлические сплавы — это поликристаллические тела. Анизотропия в них не наблюдается, они изотропны.

Аморфные тела. Среди тел, которые принято считать твердыми потому, что они сохраняют форму и обладают прочностью, есть и такие, которые существенно отличаются от кристаллов. Как показали исследования, частицы в них расположены в таком же беспорядке, как и в жидкости. Называются такие твердые тела *аморфными* (лишенными формы). Наиболее знакомым всем примером аморфного тела служит стекло. К аморфным телам относятся также смола, янтарь (природная смола), канифоль, многие искусственные материалы, известные под названием пластмасс. Аморфные тела изотропны. У них нет правильной огранки, даже у тех, что образовались в природных условиях (например, янтарь, природное стекло — обсидиан).

Полимеры. К аморфным телам относятся удивительные вещества, встречающиеся в природе или искусственно изготовленные, которые называют *полимерами*. Самое замечательное в них — это молекулы, из которых они построены. Молекулы полимеров состоят из очень большого числа атомов. Достаточно сказать, что относительная молекулярная масса полимерных веществ может достигать многих сотен тысяч и даже миллио-

нов. Молекулы полимеров имеют форму вытянутых цепочек, длина которых в десятки тысяч раз больше их поперечных размеров. Молекулы могут быть прямыми, но могут иметь и волнистую форму и сворачиваться в клубки. Этим обеспечивается большое разнообразие свойств полимеров и их широкое применение.

К природным полимерам относятся древесина (полимером в ней является целлюлоза, образующая оболочки клеток), природный каучук, рог, чук, пластики (полимеры, которые под давлением и при нагреве принимают нужную форму и сохраняют ее), плексиглас, полиэтилен и многие другие.

■ ВОПРОСЫ

1. Что такое монокристалл? поликристалл? 2. В чем состоит свойство анизотропии? изотропии? В чем причина анизотропии кристаллов? 3. Что такое аморфное тело? Чем оно отличается от кристаллического? 4. Чем отличаются полимеры от других веществ?

§ 52 Кристаллизация и плавление

При отвердевании вещества (кристаллизации) его частицы, как мы уже говорили, располагаются так, что потенциальная энергия их взаимодействия становится меньше той, которой они обладали в жидком состоянии. Но энергия исчезнуть не может. Что же с ней происходит?

Ответ на этот вопрос дает опыт.

Возьмем сосуд с расплавленным оловом, поместим в расплав термометр и дадим возможность олову остывать. При остывании олова окружающему воздуху передается некоторое количество теплоты, в результате чего кинетическая энергия частиц олова уменьшается и его температура понижается. Это и покажет термометр.

Когда температура жидкого олова станет равной 232°C , мы заметим, что температура олова перестанет понижаться, хотя окружающему воздуху по-прежнему передается некоторое количество теплоты. Почему же перестала понижаться температура?

Объясняется это тем, что именно при температуре 232°C начинается кристаллизация олова. Потенциальная энергия его частиц уменьшается, но она переходит в кинетическую, так что выделяется некоторое количество теплоты. Оно и компенсирует энергию, отдаваемую окружающей среде. Об этом и свидетельствует остановка в понижении температуры отвердевающего олова. На рисунке 96 показан график зависимости температуры t от времени τ . Горизонтальный участок графика и соответствует процессу кристаллизации. Через некоторое время этот процесс заканчивается и температура вновь понижается. Но теперь охлаждается уже твердое олово.

Теплота кристаллизации (отвердевания). Чем больше вещества переходит из жидкого состояния в твердое, тем, очевидно, большее количество теплоты выделяется. Количество теплоты, выделяющееся при превращении едини-

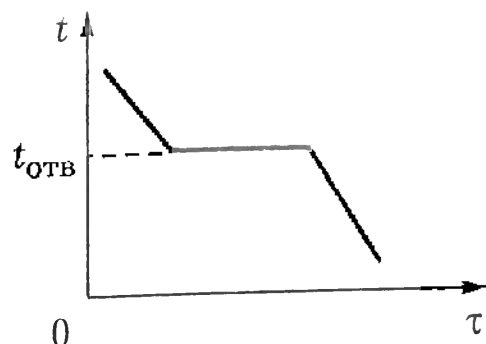


Рис. 96

цы массы твердого вещества в жидкость при той же температуре, называется *удельной теплотой кристаллизации* (отвердевания).

Если обозначить удельную теплоту кристаллизации через λ , то количество теплоты Q , которое выделяется при отвердевании жидкости массой m , равно:

$$Q = \lambda m.$$

Выражается удельная теплота кристаллизации в джоулях на килограмм (Дж/кг).

Удельная теплота кристаллизации — характерная величина для данного вещества. У олова, например, удельная теплота кристаллизации равна 58 500 Дж/кг. Очень большая удельная теплота кристаллизации у воды — 334 400 Дж/кг.

Плавление твердого тела. Плавление — это процесс, обратный кристаллизации. Если при кристаллизации кристаллическая решетка образуется, то при плавлении она разрушается. Плавление происходит при той же температуре, при которой это же вещество отвердевает. Жидкое олово отвердевает, когда оно охлаждено до температуры 232 °С. Твердое олово нужно нагреть до той же температуры, чтобы оно расплавилось.

В твердом теле частицы занимают такие положения относительно других частиц, при которых их потенциальная энергия минимальна. При плавлении, когда кристаллическая решетка разрушается, частицы покидают эти места и их потенциальная энергия возрастает. За счет чего? Очевидно, за счет кинетической энергии, которая должна уменьшиться. Но если исследовать зависимость температуры плавящегося вещества от времени,

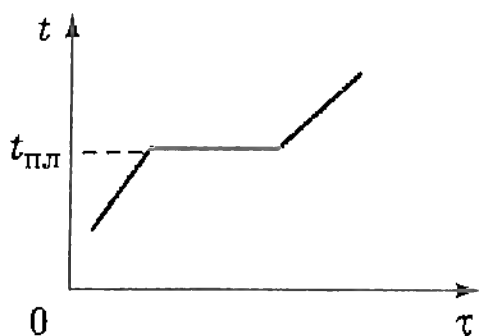


Рис. 97

как и при кристаллизации, то мы опять заметим горизонтальный участок на графике (рис. 97). Это значит, что, пока происходит плавление, температура вещества, а значит, и кинетическая энергия его частиц не изменяются. Следовательно, уменьшение кинетической энергии частиц в точности компенсируется тем количеством теплоты, которое подводится извне к плавящемуся телу. Происходит то же, что и при кипении жидкости, когда энергия, подводимая к ней, тратится на испарение, а температура ее остается постоянной.

Температура тающего льда потому и использовалась при построении температурной шкалы, что, пока лед тает (плавится), его температура, как и температура любого другого плавящегося кристаллического вещества, остается постоянной. Ясно, что, для того чтобы расплавить вещество массой 1 кг, нужно подвести к нему такое же количество теплоты, которое выделяется при кристаллизации. Количество теплоты, которое нужно подвести к веществу массой 1 кг, чтобы превратить его в жидкость при той же температуре, называется *удельной теплотой плавления*. Удельная теплота плавления обозначается так же, как удельная теплота кристаллизации, — буквой λ . Количество теплоты, необходимое для превращения твердого вещества массой m в жидкость той же температуры, определяется формулой

$$Q = \lambda m.$$

При разных переходах — разные количества теплоты. В предыдущем параграфе мы выяснили, что при переходе вещества из жидкого состояния (образования), а при обратном переходе из газообразного в жидкое состояние такое же количество теплоты выделяется (теплота конденсации). Теперь мы видим, что и переход из жидкого состояния в твердое и из твердого в жидкое тоже сопровождается выделением определенного количества теплоты (теплота кристаллизации) или поглощением ее (теплота плавления).

Но для этих процессов характерны меньшие количества теплот перехода. Если, например, у спирта удельная теплота испарения при температуре кипения равна 905 кДж/кг, то удельная теплота плавления его равна 109 кДж/кг, т. е. почти в 9 раз меньше. У льда удельная теплота плавления равна 334 кДж/кг, т. е. в 7 раз меньше удельной теплоты испарения (2200 кДж/кг). В чем причина такой большой разницы в удельных теплотах перехода? Объяснение очень простое. Когда жидкость превращается в пар, энергия тратится на полное преодоление сил притяжения между молекулами. Когда же твердое тело переходит в жидкое состояние, энергия расходуется только на разрушение порядка в расположении частиц. Силы же взаимодействия между ними, а значит, и энергия взаимодействия почти не изменяются.

Заметим здесь, что удельная теплота плавления льда, хотя она и много меньше удельной теплоты испарения воды, все же велика по сравнению с удельной теплотой плавления большинства других веществ. Она, например, в 13 раз больше, чем удельная теплота плавления ртути, в 20 раз больше, чем олова, и т. д. Таким образом, вода (лед) и здесь выступает как чемпион (только у кремния и алюминия удельные теплоты плавления больше). То, что у льда относительно большая удельная теплота плавления, очень важно. Благодаря этому снег весной тает медленно. Если бы теплота плавления льда была раз в десять меньше, то каждый год происходили бы катастрофические наводнения, интенсивно таяли бы полярные и горные ледники, что имело бы тяжелые последствия.

Плавятся только кристаллы. Аморфные тела при нагревании тоже становятся жидкими, а при охлаждении твердеют. Но для аморфных веществ нет такой температуры, о которой можно было бы сказать, что выше ее вещество жидкое, а ниже — твердое. Аморфные тела не плавятся. Они при нагревании постепенно *размягчаются*. Частицы аморфных тел в твердом состоянии расположены так же беспорядочно, как и в жидком. При отвердевании аморфного тела постепенно уменьшается кинетическая энергия его частиц, но они не располагаются в правильном порядке, и их потенциальная энергия не уменьшается. Понятно, что при переходе аморфных тел из жидкого состояния в твердое и обратно не выделяется теплота кристаллизации и не поглощается теплота плавления.

■ ВОПРОСЫ

1. В чем состоит процесс отвердевания? плавления?
2. Как изменяется потенциальная энергия взаимодействия частиц при кристаллизации тела? при плавлении?
3. Почему на графиках зависимости температуры от времени при плавлении и кристаллизации наблюдается «остановка» в изменении температуры?
4. Если нагреть стекло до 500 °С, оно станет жидким. Можно ли сказать, что стекло расплавилось?
5. Если при

нагревании стекла или другого аморфного тела исследовать зависимость температуры от времени, будет ли наблюдаться «остановка» в росте его температуры?

■ УПРАЖНЕНИЕ 20

1. Какое количество теплоты требуется для расплавления чугуна массой 6 т с момента, когда чугун нагрелся до температуры его плавления? Удельная теплота плавления чугуна равна 140 000 Дж/кг.
2. К куску свинца массой 2,5 кг, находившемуся при температуре 0 °С, подведено некоторое количество теплоты, в результате чего он расплавился. Какое количество теплоты было подведено, если удельная теплота плавления свинца равна 23 кДж/кг, его удельная теплоемкость 125 Дж/(кг · К), а температура плавления свинца 600 К?
3. При отвердевании воды массой 1 кг выделяется 334 000 Дж. На сколько можно повысить температуру воды массой 1 кг за счет этого количества теплоты? Удельная теплоемкость воды равна 4186 Дж/(кг · К).

§ 53 Упругая деформация твердых тел

В главе 3 сказано, что при малых деформациях тела возникает сила упругости $\vec{F}_{\text{упр}}$, модуль которой определяется законом Гука:

$$F_{\text{упр}} = k |\Delta l|, \quad (1)$$

где Δl — удлинение (или сжатие) тела, а k — его жесткость.

Теперь мы можем более подробно выяснить, почему возникает сила упругости, как объясняет ее возникновение молекулярно-кинетическая теория строения вещества. В качестве примера мы рассмотрим деформацию растяжения кристаллического стержня.

На рисунке 98, а схематически показано расположение частиц в стержне до растяжения. Каждая частица расположена так, что сумма сил, действующих на нее со стороны других частиц, равна нулю. Расстояние между частицами — это то равновесное расстояние r_0 , о котором мы не раз упоминали (см. § 34). Положение частицы в решетке можно сравнить с положением шарика на дне углубления.

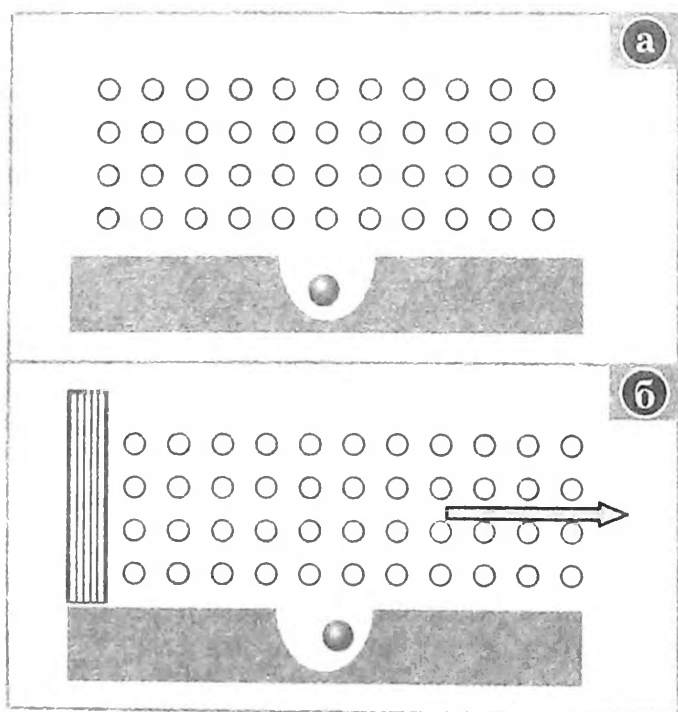


Рис. 98

Если один конец стержня закреплен (рис. 98, б), а к другому приложена внешняя сила, то она сообщает частицам у этого конца ускорение и они смещаются со своих мест. При этом расстояния между сместившимися частицами и частицами в следующем слое увеличиваются и возникают силы притяжения, так как эти расстояния стали больше чем r_0 . Смещаются поэтому частицы и этого слоя, а вслед за ними и все другие, кроме частиц у закрепленного конца стержня. Стержень оказывается деформированным, расстояния между частицами больше равновесного r_0 , так что между ними действуют силы притяжения. Это и есть силы упругости, стремящиеся вернуть частицы в

прежнее положение. После прекращения действия внешней силы молекулы вернутся на свои места, исчезнет деформация и сила упругости. Такая сила, называется *упругой*. Чтобы деформация была упругой, она должна быть малой — частицы не должны смещаться от положения равновесия на расстояния, большие, чем их собственные размеры.

Закон Гука в другой форме. Опыт показывает, что жесткость стержня пропорциональна площади его поперечного сечения S и обратно пропорциональна его длине l :

$$k = E \frac{S}{l}. \quad (2)$$

где E — коэффициент пропорциональности. Подставив это выражение в формулу (1) и разделив обе части равенства на S , получим:

$$\boxed{\frac{F_{\text{упр}}}{S} = E \frac{|\Delta l|}{l}}. \quad (3)$$

В левой части этого равенства вместо модуля силы $\vec{F}_{\text{упр}}$ теперь стоит отношение $\frac{F_{\text{упр}}}{S}$. Эта величина называется *механическим напряжением* (или просто напряжением). Ее принято обозначать буквой σ . Выражается напряжение в тех же единицах, что и давление, т. е. в паскалях.

В правой части равенства (3) вместо удлинения $|\Delta l|$ мы видим отношение $\frac{|\Delta l|}{l}$, называемое *относительным удлинением*. Его обозначают греческой буквой ε (эпсилон). Оно показывает, какую часть первоначальной длины стержня составляет удлинение. Это более удобная характеристика деформации, чем удлинение $|\Delta l|$. Ведь при растяжении (или сжатии) стержня изменяется длина любого участка стержня, так что у более длинного стержня и удлинение будет больше при том же напряжении, а относительное удлинение $\frac{|\Delta l|}{l}$ будет одним и тем же.

Наконец, вместо жесткости k в формуле (3) стоит величина, связанная с k соотношением $E = \frac{kl}{S}$. Величина E называется *модулем упругости* (ее называют также модулем Юнга). Выражается модуль упругости тоже в паскалях. Таким образом, закон Гука можно теперь записать в виде

$$\boxed{\sigma = E\varepsilon}.$$

В отличие от жесткости k , которая характеризует данный стержень, модуль Юнга характеризует вещество, из которого он сделан. У стали, например, модуль Юнга равен $2,2 \cdot 10^{11}$ Па, у свинца — $1,7 \cdot 10^{10}$ Па, а у графитовых нитей — 10^{12} Па. Чем больше модуль упругости материала, тем больше напряжение σ в стержне, изготовленном из него при данном относительном удлинении стержня.

Закон Гука — только при малых деформациях! Диаграмма растяжения. Закон Гука, как уже не раз указывалось, справедлив только при ма-

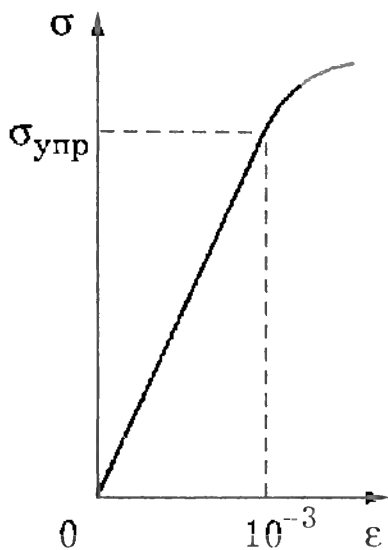


Рис. 99

лых деформациях, т. е. при малых ϵ . Для каждого вещества есть такая предельная деформация, выше которой оно перестает быть упругим.

На рисунке 99 показан график зависимости напряжения σ , возникающего в материале при деформации, от относительного удлинения ϵ . Такой график называется *диаграммой растяжения*. Из него видно, что напряжение пропорционально удлинению (график — прямая) только до ϵ около 10^{-3} (0,1%). При больших напряжениях деформация перестает быть упругой — закон Гука не выполняется. То напряжение в материале, выше которого деформация перестает быть упругой, называется *пределом упругости* ($\sigma_{\text{упр}}$). Когда деформация тела ϵ достигает такого значения, при котором вызванное ею напряжение превышает предел упругости, она не

исчезает после прекращения действия силы. Остается так называемая *остаточная деформация*. В таблицах указывается обычно не предельная деформация, а предел упругости. У разных материалов пределы упругости различны. У стали, например, предел упругости около $3 \cdot 10^8$ Па, у свинца — 10^7 Па.

В технике во многих случаях необходимо, чтобы материалы испытывали только упругие деформации. Недопустимо, например, чтобы деформации домов, кораблей, инструментов, канатов и других сооружений и изделий были не упругими. Для этого модуль упругости соответствующих материалов должен быть достаточно высок. Высоким должен быть и предел упругости. Вот почему канаты изготавливают из стали, а не из свинца, у которого модуль Юнга в 12 раз, а предел упругости в 30 раз меньше, чем у стали.

■ ВОПРОСЫ

1. Что такое упругая деформация? 2. Что такое относительное удлинение? 3. Что такое модуль упругости? В каких единицах он выражается? 4. Что такое механическое напряжение? Как оно связано с относительным удлинением? 5. Что такое предел упругости? В каких единицах он выражается?

■ УПРАЖНЕНИЕ 21

1. К стальной нити толщиной 1 мм и длиной 1 м подвешен груз массой 100 кг. На сколько удлинится нить, если модуль Юнга для стали равен $2,2 \cdot 10^{11}$ Па? Каково относительное удлинение нити?
2. Стальную нить (см. предыдущую задачу) требуется заменить латунной такой же длины. Каким должен быть диаметр этой нити, чтобы ее относительное удлинение было таким же, как у стальной? Модуль упругости латуни равен 10^{11} Па.
3. Стальной прут длиной 6 м и диаметром 2 см удлинился на 2 мм. Чему равна возникшая при этом сила упругости?

§ 54

Пластическая деформация твердых тел

Если механическое напряжение в материале, возникающее при деформации, превышает предел упругости, то после снятия нагрузки (внешней силы) деформация не исчезает. Такой процесс, при котором возникает остаточная деформация, называется *пластической деформацией*.

При упругой деформации после прекращения действия внешней силы (нагрузки) смещенные частицы действуют друг на друга силами притяжения, которые заставляют их снова занять свои места в кристаллической решетке. При пластической деформации частицы тела тоже, конечно, смещаются. Но после снятия нагрузки они не возвращаются на прежние места. Что же происходит при пластической деформации? Почему при пластической деформации не возникают силы, возвращающие частицы на прежние места?

Не растяжение, а соскальзывание. Наблюдения показали, что при пластической деформации смещения частиц в кристалле имеют совсем другой характер, чем при упругой. Оказывается, при пластической деформации кристалла (рис. 100, а) происходит соскальзывание слоев кристалла относительно друг друга (рис. 100, б). Это можно увидеть с помощью микроскопа.

Гладкая поверхность кристаллического стержня после пластической деформации становится шероховатой. Соскальзывание происходит вдоль слоев, в которых больше всего атомов. Напомним, что такие слои отстоят на наибольших расстояниях друг от друга (см. § 51).

Такое соскальзывание означает, что частицы кристалла (рис. 101) смещаются так, как это показано на рисунке 102. При таких смещениях частиц тело оказывается деформированным, но на смещенные частицы при этом не действуют «возвращающие» силы. Ведь у каждого атома в его новом положении такие же соседи и в таком же числе, как и до смещения. Значит, и силы, действующие на частицы, в сумме равны нулю. Если мы снова сравним положение частиц в кристалле с положением шарика в углублении, то можно сказать, что перемещение частицы при пластической деформации похоже на перемещение шарика из углубления 1 в углубление 2 (рис. 103). Ясно, что положение шарика в углублении 2 такое же устойчивое, как и в углублении 1, и нет причин, которые заставили бы шарик возвратиться в углубление 1.

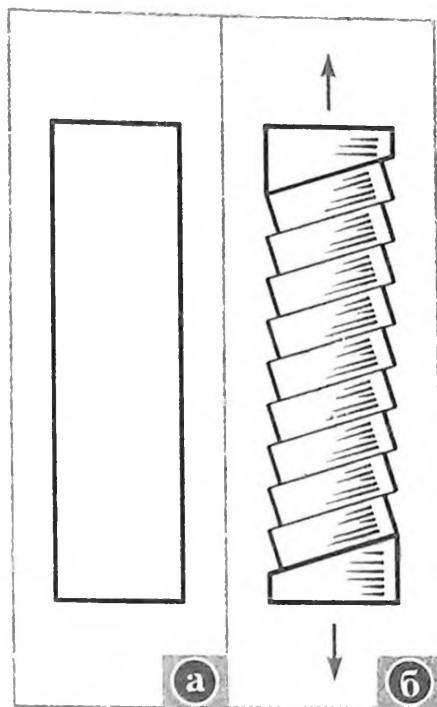


Рис. 100

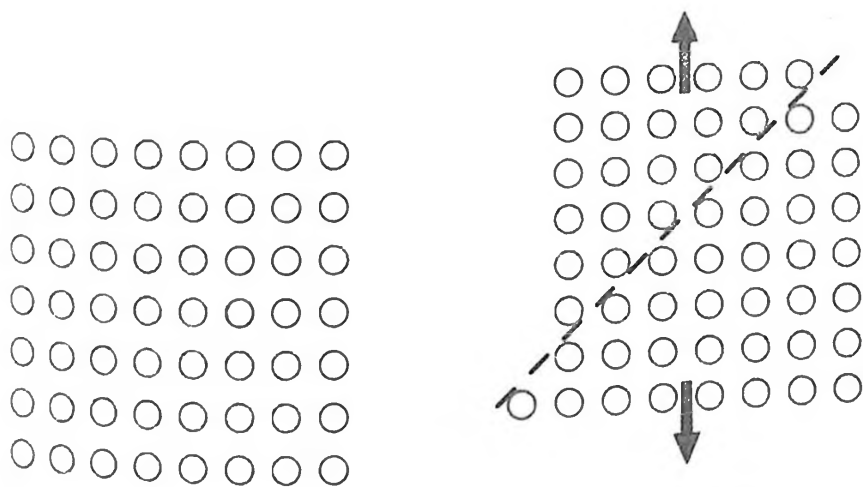


Рис. 101

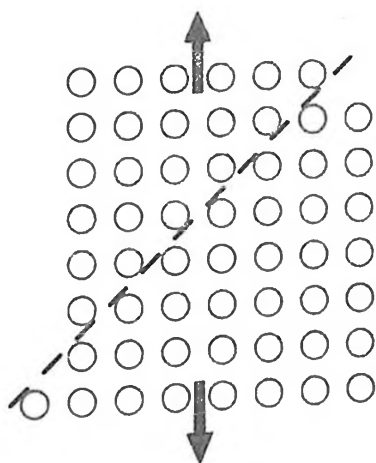


Рис. 102

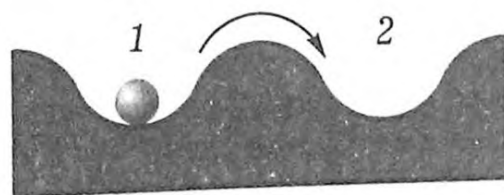


Рис. 103

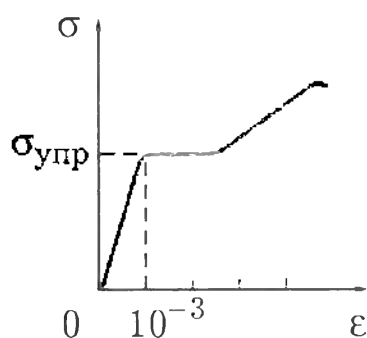


Рис. 104

Прочность и предел прочности. В начале главы мы упоминали, что одним из свойств твердых тел является прочность. Это свойство состоит в том, что для разрушения твердого тела (чтобы частицы его оторвались друг от друга) его нужно сначала деформировать. Пока внешняя сила такова, что деформация тела вызывает напряжение в теле, меньшее предела упругости, тело не разрушается. Пластическая же деформация в конце концов приводит к разрушению тела. При пластической деформации напряже-

ния в материале с увеличением относительного удлинения возрастают значительно медленнее, чем при упругой. Это показано на рисунке 104, на котором график, знакомый нам по рисунку 99, продолжен до напряжений, превышающих предел упругости. Из графика видно, что при напряжении, немного большем предела упругости, начинается странное явление: удлинение растет, а напряжение остается почти постоянным. Это явление называется текучестью. Затем с увеличением удлинения напряжение некоторое время растет, достигает максимального значения, после чего происходит разрушение (разрыв, если идет речь о растяжении) тела. То максимальное напряжение, после достижения которого тело разрушается, называется *пределом прочности материала*. У разных материалов он различен. У стали, например, предел прочности равен $4 \cdot 10^9$ Па.

Существуют такие материалы, которые разрушаются при напряжениях, очень близких к пределу упругости. Такие материалы называются хрупкими. Они не поддаются пластической деформации. Хрупки, например, чугун, вольфрам, некоторые сорта стали.

Аморфные твердые тела также не могут деформироваться пластически. У них ведь нет кристаллической решетки, нет и слоев частиц, которые могли бы скользить друг относительно друга. Упругими свойствами они обладают, и предел упругости у них тоже есть. Но при напряжениях выше предела упругости они просто ломаются. Так ведет себя, например, стекло.

Материалы, которые разрушаются при напряжениях, значительно превышающих предел упругости, называются *пластичными*. Пластичны алюминий, медь, железо, многие сорта стали и др. Благодаря пластичности такие материалы можно подвергать различной обработке: ковке, штамповке, волочению и т. д.

■ ВОПРОСЫ

1. Что такое пластическая деформация?
2. Чем отличаются смещения частиц кристалла при пластической деформации от их смещений при упругой деформации?
3. Чем отличаются хрупкие материалы от пластичных?
4. Могут ли пластически деформироваться некристаллические материалы?

§ 55

Как создаются нужные технике материалы

Подавляющее большинство используемых в технике материалов — это твердые кристаллические вещества. Они должны обладать нужными свойствами. А свойства требуются самые разнообразные. Нужны материалы с высокой прочностью, твердостью, с высокой температурой плавления, материалы с определенными электрическими, магнитными, оптическими

свойствами. К техническим материалам предъявляются и многие другие требования. Непосредственно в природе таких материалов нельзя найти. Их нужно создавать. Как же это делается?

Идеальных кристаллов не бывает. Мы говорили о кристалле как о теле, в котором *одинаковые* частицы (например, атомы) расположены в определенном, правильном порядке во всем объеме тела. Но таких идеальных кристаллов нет и быть не может. Такой идеальный кристалл мог бы существовать только при температуре, равной абсолютному нулю. В реальном кристаллическом теле правильность в расположении частиц обязательно так или иначе нарушена. Эти нарушения, искажения правильности структуры кристалла называются *дефектами* кристалла.

Дефекты в кристалле неизбежны уже потому, что частицы кристалла совершают тепловые движения. Движения эти беспорядочные, несогласованные. Поэтому какая-то частица случайно может получить энергию от своих соседей и выскочить из узла решетки, который она занимает, оставив его пустым, или, как говорят, вакантным. Сама выскочившая частица расположится где-то между узлами решетки. Образуются сразу два дефекта решетки: пустой узел и частица между узлами. При огромном числе атомов в любом теле такие случайности не только возможны, но и неизбежны. Но это не единственный вид дефектов. В кристалле, состоящем из атомов какого-то вещества, могут оказаться в большем или меньшем числе атомы других веществ. Эти «чужие» (как говорят, примесные) частицы тоже как-то располагаются в кристалле и «портят» порядок в нем. Примесные атомы — это тоже дефекты. Они так же неизбежны, как и вакантные узлы и атомы между узлами. Еще никому не удавалось изготовить кристалл, совершенно лишенный примесей.

В поликристаллических телах существуют границы между кристалликами. Это тоже дефекты. Есть в любом кристалле и другие, не менее важные дефекты, которые мы здесь не будем перечислять. Любой кристалл — это сочетание порядка и беспорядка, создаваемого дефектами.

Дефекты кристалла влияют на его свойства. Дефекты в кристалле сильнейшим образом влияют на его свойства. Это знали еще в древние времена. Как известно, первым металлом, который люди использовали для изготовления орудий труда, оружия и т. д., была медь, не очень пригодная для этих целей. Но уже тогда было сделано важное открытие: если добавить к меди олово, то получается материал со свойствами, более подходящими и для орудий труда, и для оружия. Этот материал был назван бронзой.

Кристалл оксида алюминия (Al_2O_3) сам по себе бесцветен. Но ничтожные примеси хрома в нем делают его красным и превращают в драгоценный камень — рубин.

Тот же бесцветный кристалл Al_2O_3 становится синим, если его «испортить» дефектами в виде очень малых примесей железа и титана. Они сообщают кристаллу синеву и дают ему **новое название** — сапфир.

Это сильное влияние дефектов на свойства твердых тел используют для создания материалов с нужными свойствами.

Как манипулируют дефектами? Существует много способов оказывать влияние на дефекты в кристалле, на их число, характер и поведение. Приведем только некоторые примеры.

Уже знакомая нам пластическая деформация — это сильное воздействие на кристалл, и она создает в кристалле немалое число дефектов. В результате происходит упрочнение материала. Такие виды обработки материалов, как ковка, прокатка и др., — это тоже пластическая деформация, они издавна используются для улучшения свойств материалов.

Очень широко применяется метод создания дефектов введением примесей. Чистое железо, например, «плохой» материал. Но добавка к нему небольшого количества углерода превращает мягкое железо в твердую сталь. А добавка к стали других примесей — хрома, вольфрама, никеля, титана — изменяет свойства самой стали.

Увеличивать или уменьшать число и виды дефектов в кристалле можно за счет изменения температуры (закалка, отжиг) и использования излучений и др. Все эти способы активно изучаются, потому что создание новых материалов и улучшение свойств существующих — одна из важнейших задач физики твердого тела.

Монокристаллы в технике используются редко. Однако вся полупроводниковая электроника основана на использовании именно самых совершенных монокристаллов (кремния и германия). Но их все же обязательно нужно «испортить» примесями (в очень малом количестве) других элементов. Без них, т. е. без примесных дефектов, они совершенно непригодны. Об этом подробнее будет рассказано в главе 21.

■ ВОПРОСЫ

1. Может ли кристалл быть безусловно правильным? 2. Какие дефекты в кристалле возникают сами собой, без вмешательства извне? 3. Какие вы знаете способы создания дефектов в твердом теле?

§ 56 Жидкие кристаллы

Название этого параграфа может показаться противоречащим здравому смыслу. Ведь кристалл — это твердое тело, в котором частицы (атомы, молекулы) расположены в строгом порядке, лишь слегка нарушаемом дефектами. Напротив, в жидкости никакого порядка в расположении атомов нет. Кристаллические тела сохраняют свою форму и не текут. Жидкости, наоборот, принимают форму сосуда, в котором находятся, и обладают свойством текучести. Кристаллы анизотропны, жидкости же изотропны. Поэтому сочетание слов «жидкий кристалл» может показаться таким же нелепым, как «горячий холод».

И тем не менее жидкие кристаллы в природе существуют. Их изучают около 100 лет, а в последние десятилетия они получили широкое применение в технике и быту.

Не каждое вещество может стать жидким кристаллом. В жидкокристаллическом состоянии можно наблюдать далеко не каждое вещество. Но таких веществ все же довольно много — несколько тысяч. Все они представляют собой органические (т. е. углеродсодержащие) вещества со сложным химическим составом. Их молекулы содержат очень большое число атомов, относительная молекулярная масса этих веществ много больше 100. И самое главное — молекулы веществ, способных стать жидкими кристаллами, имеют, как правило, сильно вытянутую форму. Их длина часто в 8—10 раз больше их поперечных размеров, хотя сами размеры мо-

лекул, конечно, очень малы. Молекула, например, может быть длиной $4 \cdot 10^{-9}$ м, а в поперечнике — $5 \cdot 10^{-10}$ м.

Жидкокристаллическое состояние — состояние промежуточное. Что это означает, мы поймем, ознакомившись с самым открытием жидких кристаллов. Открытие было сделано в 1889 г. австрийским ботаником Р. Рейницером. Состояло же оно вот в чем. Если нагревать твердое кристаллическое органическое вещество холестерилбензоат¹, то оно плавится при температуре 145°C и превращается в мутную жидкость. При дальнейшем нагревании при температуре 179°C эта жидкость внезапно становится прозрачной. Оказывается, мутная жидкость, существующая в интервале температур от 145 до 179°C , и есть жидкий кристалл. По своим свойствам это жидкость: она течет, принимает форму сосуда, образует капли, правда не сферические, а вытянутые. Но в этой жидкости молекулы расположены в определенном порядке. Следовательно, она должна иметь и свойства кристалла. И она действительно их имеет. Но при температуре 179°C порядок исчезает, исчезают и свойства кристалла. При этой температуре происходит как бы второе плавление: «плавится» жидкий кристалл, превращаясь в обычную жидкость.

Так же ведут себя и другие вещества, в которых наблюдается жидкокристаллическое состояние. Для каждого из них есть определенный интервал температур, в пределах которого вещество одновременно и жидкость, и кристалл. Они разные, эти интервалы. Есть вещества, у которых они более удобны для практического применения веществ, чем приведенный выше, например от -40 до $+80^\circ\text{C}$ или от -50 до $+110^\circ\text{C}$ и т. д. При температурах ниже левой границы интервала вещество — твердый кристалл, выше правой границы — обычная жидкость. А жидкокристаллическое состояние — промежуточное между твердым и жидким состояниями.

Каков порядок в жидких кристаллах? Существуют три типа жидких кристаллов с тремя различными видами порядка расположения молекул в них. Два из них схематически представлены на рисунке 105, а, б. Здесь молекулы условно изображены в виде удлиненных палочек, хотя в действительности форма молекул, каждая из которых содержит десятки атомов, очень сложная.

В жидких кристаллах первого типа (рис. 105, а) центры молекул расположены беспорядочно, но сами молекулы примерно параллельны друг другу. Порядок состоит в том, что одинакова ориентация осей молекул. Жидкие кристаллы с таким видом упорядоченности называются *нематическими* кристаллами (нематики).

Возможен порядок другого вида (рис. 105, б). И здесь молекулы ориентированы одинаково. Но кро-

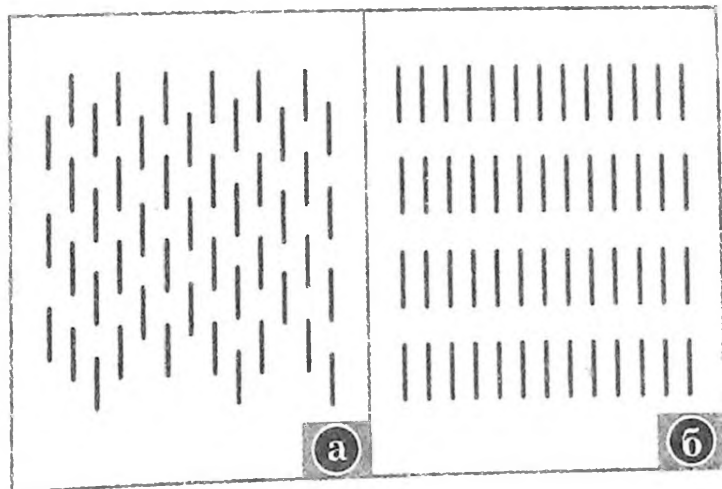


Рис. 105

¹ В дальнейшем мы не будем приводить названия веществ, могущих стать жидкими кристаллами. Они, как правило, очень длинные и понятны только специалистам по органической химии.

ме того, они образуют правильно чередующиеся слои, параллельные друг другу. Это *смектические* жидкие кристаллы (смектики). Хорошо известным примером такой структуры жидкого кристалла служит водный мыльный раствор (греческое слово «смектика» и означает «мыло»). В мыльном растворе тонкие слои из молекул мыла чередуются тонкими же слоями воды. С такой структурой связано и моющее свойство раствора: слои легко скользят друг относительно друга, частицы мыла отнимают грязь и отдают ее воде.

Существует еще и третий тип жидкого кристалла — *холестерический* жидкий кристалл (холестерик). Порядок в нем похож на нематический, но направления осей молекул периодически изменяются, образуя как бы спираль (такую структуру трудно изобразить на плоском рисунке).

Порядок в расположении молекул в жидких кристаллах (как и в твердых!) поддерживается силами взаимодействия между молекулами. Беспорядочные тепловые движения, которые совершают молекулы в жидком кристалле, должны были бы нарушить этот порядок. И если он все же существует, то только потому, что кинетическая энергия тепловых движений недостаточна для того, чтобы за счет этой энергии могла быть совершена работа против этих сил взаимодействия.

Некоторые свойства жидких кристаллов. Практические применения. Одна из важных особенностей жидких кристаллов — это анизотропия, т. е. различие свойств в различных направлениях.

Уже из структуры молекул жидкого кристалла (см. рис. 105, а, б) видно, что его свойства в направлении осей молекул должны отличаться от тех же свойств в направлениях, не совпадающих с направлением этих осей. Опыт показывает, что действительно практически все свойства жидких кристаллов (электрические, магнитные, оптические, упругие и т. д.) различны в разных направлениях.

Особенно интересны оптические свойства жидких кристаллов, связанные с распространением света в них. Тут дело не только в анизотропии, но и в том, что оптические свойства жидких кристаллов можно изменять воздействием на кристалл электрическими, магнитными полями, изменением температуры, давления и т. д. Даже прохождение звука (особенно ультразвука) может влиять на оптические свойства жидкого кристалла.

На практике обычно используются очень тонкие (сотые доли миллиметра) слои жидкого кристалла 1, заключенные между двумя прозрачными, проводящими электричество пластинами (пленками) 2, разделенными изолирующими прокладками 3 (рис. 106). Действием электрического поля жидкий кристалл в этой, как говорят, электрооптической ячейке можно сделать прозрачным или непрозрачным. А если к жидкому кристаллу

добавить немного красителя, то можно изменять и цвет жидкого кристалла. Такого рода ячейки широко используются в различных устройствах, связанных с отображением информации. Сотни таких ячеек образуют, например, циферблат электронных часов. Они используются также в калькуляторах, в цифровых измери-

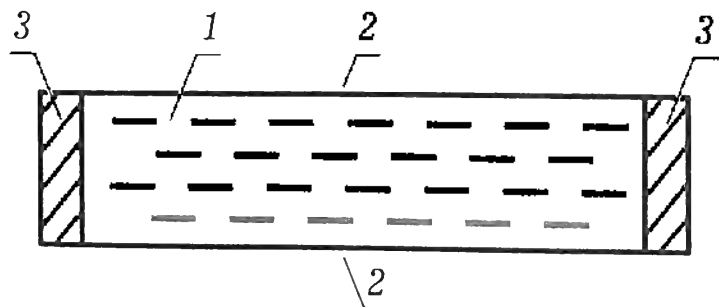


Рис. 106

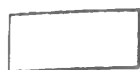
тельных приборах, в телевизионных устройствах, во многих устройствах автоматики.

У некоторых жидких кристаллов настолько сильно цвет зависит от температуры, что глазом можно заметить **изменение** температуры всего на сотую градуса. Понятно, что это свойство можно использовать для измерения температуры.

Практические применения жидких кристаллов многочисленны уже теперь. В дальнейшем их использование, несомненно, будет более широким.

■ ВОПРОСЫ

1. Холестерилбензоат нагрет до температуры 185 °С, после чего он начинает охлаждаться. Что произойдет с веществом при температуре 179 °С? при 145 °С? 2. Что общего в упорядоченности нематиков и смектиков? В чем различие в упорядоченности этих двух типов жидких кристаллов? 3. В чем различие между жидким кристаллом и жидкостью? между жидким кристаллом и твердым телом?



Самое важное в двенадцатой главе

Твердые тела отличаются от жидкостей и газов упорядоченным расположением частиц, т. е. кристаллической структурой. Узлы кристаллической решетки — это равновесные положения частиц, около которых частицы совершают колебания малой амплитуды. Это и есть тепловые движения. Частицы колеблются, но не перемещаются по объему тела.

При определенной для данного вещества температуре — температуре плавления — кристаллическая структура разрушается и твердое тело превращается в жидкость. При охлаждении жидкости она при той же температуре превращается в твердое тело — возникает кристаллическая структура. Наряду с кристаллическими твердыми телами существуют и твердые тела, в которых правильного расположения частиц нет. Это аморфные тела. В них частицы расположены в таком же беспорядке, как и в жидкости. У аморфных тел нет температуры плавления. Они не плавятся, а размягчаются.

При небольших (упругих) деформациях твердых тел справедлив закон Гука, устанавливающий линейную зависимость между напряжением σ в твердом теле и относительной деформацией ϵ :

$$\sigma = E\epsilon,$$

где E — модуль Юнга, характеризующий вещество.

При достаточно больших деформациях твердые тела перестают быть упругими.

Деформации не исчезают полностью при прекращении действия нагрузки (явление остаточной деформации). Такая деформация называется пластической. Пластическая деформация делает возможным штамповку, ковку, прокатку и т. д.

В любом кристалле существуют дефекты — искажения его структуры. Дефекты могут быть созданы в кристалле и искусственно. Они сильно влияют на свойства твердых тел.

Основная задача термодинамики

В давние времена люди использовали в качестве орудий труда простые машины: рычаги, наклонную плоскость и т. д. В течение тысячелетий работа с помощью этих машин совершалась за счет механической энергии ветра, падающей воды; чаще всего применялась энергия людей и животных.

Около 200 лет тому назад началось широкое применение в технике другого вида энергии — внутренней энергии. Сейчас около 80% используемой человечеством энергии — это внутренняя энергия топлива. Поэтому важно выяснить, как внутренняя энергия используется для получения механической работы.

Раздел физики, который возник из изучения этого вопроса, называется термодинамикой. Термодинамика — это наука о тепловых явлениях, основанная на некоторых общих законах, относящихся к превращениям энергии. Эти законы справедливы для всех тел независимо от их внутреннего строения.

В этой главе мы рассмотрим законы термодинамики и одну из ее основных задач — наиболее эффективное использование внутренней энергии для совершения работы.

§ 57 Внутренняя энергия и ее использование для совершения работы

Напомним, что внутренней энергией тела называется сумма кинетической энергии хаотического движения его молекул и потенциальной энергии их взаимодействия.

Внутренняя энергия идеального одноатомного газа¹ представляет собой только кинетическую энергию теплового движения молекул. Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул равна $\frac{3}{2}kT$ (см. § 38). Поэтому внутренняя энергия U газа некоторой массы, содержащего N молекул, равна $U = \frac{3}{2}NkT$. Так как $N = \frac{m}{M}N_A$, то

$$U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} k N_A T,$$

или

$$U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT.$$

Из этой формулы следует, что при нагревании газа его внутренняя энергия увеличивается, а при охлаждении уменьшается.

Превращение внутренней энергии в механическую. Из курса физики IX класса известно, что механическая энергия изменяется при совершении

¹ Частицы одноатомного газа могут совершать только поступательное движение.

работы. Внутренняя энергия изменяется как при совершении работы, так и при теплопередаче. Напомним (см. учебник физики для VIII класса), что мера изменения внутренней энергии при **теплопередаче** называется *количеством теплоты*. Проще всего изменить, например уменьшить, внутреннюю энергию тела, приведя его в соприкосновение с более холодным телом. При этом горячее тело передает часть **своей** внутренней энергии более холодному телу, т. е. энергия беспорядочного движения частиц горячего тела переходит в энергию беспорядочного движения частиц холодного тела. В результате температуры тел **выравниваются**. Но так как оба тела **не перемещаются**, то работа не **совершается**.

Значит, внутреннюю энергию, **теряемую** телом при **теплопередаче**, нельзя использовать для совершения механической работы. При каких же условиях за счет внутренней энергии может быть совершена работа?

Как известно, работа совершается только при упорядоченном перемещении тела, когда все его частицы движутся вместе, в одну сторону. **Внутренняя же энергия** — это энергия беспорядочного движения молекул. Следовательно, для того чтобы за счет внутренней энергии тела могла быть совершена работа, необходимо каким-либо способом преобразовать хаотическое движение его молекул в упорядоченное движение тела. Для этого наиболее удобно использовать, например, газ, находящийся в цилиндре с поршнем. Если давление газа больше давления окружающего воздуха, то беспорядочное движение молекул газа в цилиндре вызывает перемещение поршня. Газ расширяется, его объем увеличивается. При этом сила, с которой газ действует на поршень, совершает положительную работу (направления силы и перемещения совпадают).

Мы видим, что здесь сила давления газа совершает работу при его расширении за счет внутренней энергии газа.

■ ВОПРОСЫ

1. Какими способами можно изменить внутреннюю энергию тела? 2. Какая величина служит мерой изменения внутренней энергии при теплопередаче? 3. При помощи какого простейшего устройства можно преобразовать энергию хаотического движения молекул в механическую энергию?

■ ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

1. Количество гелия 12 моль. Чему равна его внутренняя энергия при температуре 27 °С?

Решение. Внутренняя энергия одноатомного газа определяется по формуле

$$U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT,$$

где $\frac{m}{M} = \nu$ — число молей вещества. Значит, $U = \frac{3}{2} \nu RT$. Так как

$T = 273 + t = 300$ К, то

$$U = \frac{3}{2} \cdot 12 \text{ моль} \cdot 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \cdot 300 \text{ К} = 44\,820 \text{ Дж};$$

$$U \approx 45 \text{ кДж}.$$

2. Количество одноатомного идеального газа 2 моль. Газ при температуре 200 К изохорно перевели в состояние, в котором давление в 2 раза больше, а

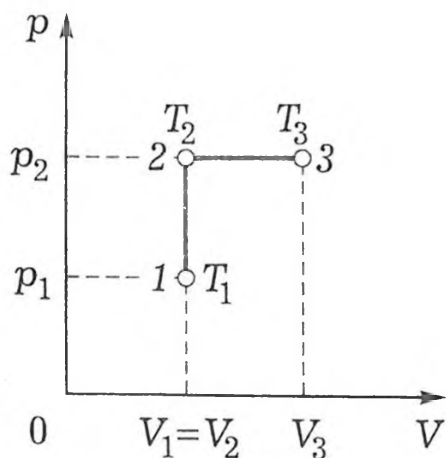


Рис. 107

затем изобарно в состояние, в котором объем в 2 раза больше первоначального (рис. 107). Найдите изменение внутренней энергии газа.

Решение. Изменение внутренней энергии происходит в обоих процессах, так как они оба протекают при повышении температуры.

Изменение внутренней энергии при изменении температуры газа равно

$$\Delta U = \frac{3}{2} \nu R \Delta T,$$

где $\Delta T = T_3 - T_1$.

Из уравнения состояния газа $pV = \nu RT$ для состояний 1, 2 и 3 можно найти изменения температуры газа в каждом процессе.

Для состояний 1, 2 в изохорном процессе:

$$p_1 V_1 = \nu R T_1 \quad \text{и} \quad p_2 V_1 = \nu R T_2,$$

где $p_2 = 2p_1$.

$$\text{Отсюда } \frac{p_1}{2p_1} = \frac{T_1}{T_2}; \quad T_2 = 2T_1.$$

Для состояний 2, 3 в изобарном процессе:

$$p_2 V_1 = \nu R T_2 \quad \text{и} \quad p_2 V_3 = \nu R T_3,$$

где $V_3 = 2V_1$.

$$\text{Отсюда } \frac{V_1}{2V_1} = \frac{T_2}{T_3}; \quad T_3 = 2T_2, \quad \text{или} \quad T_3 = 4T_1.$$

Следовательно,

$$\Delta T = 4T_1 - T_1 = 3T_1, \quad \Delta U = \frac{3}{2} \nu R 3T_1,$$

$$\Delta U = \frac{3 \cdot 2 \text{ моль} \cdot 8,31 \text{ Дж} \cdot 600 \text{ К}}{2 \text{ моль} \cdot \text{К}} = 1,49 \cdot 10^4 \text{ Дж}.$$

■ УПРАЖНЕНИЕ 22

1. Чему равна внутренняя энергия гелия массой 4 г при температуре 127 °С?
2. Температура 20 г аргона повысилась на 10 °С. Как изменилась его внутренняя энергия?
3. Чему равно изменение внутренней энергии идеального одноатомного газа при его охлаждении на 20 °С? Количество газа 10^3 моль.

§ 58 Как найти работу при изменении объема газа

Мы видели (см. § 57), что сила давления газа совершает работу при его расширении, т. е. при изменении объема газа. Чему равна эта работа? От чего она зависит?

Обратимся к опыту с газом в цилиндре. Если газ, расширяясь, сместил поршень на расстояние Δl (рис. 108, а), то работа, совершенная при этом силой давления газа $\vec{F}$, равна

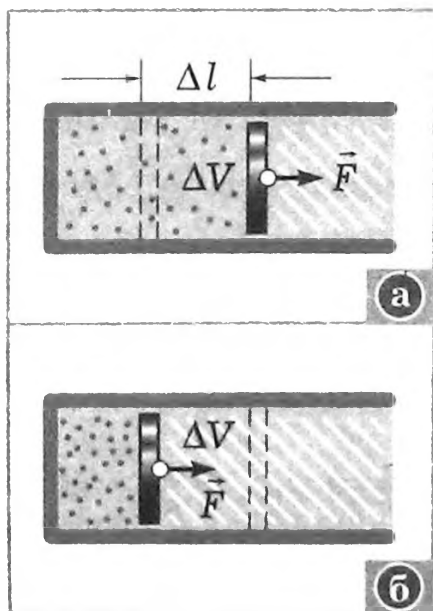


Рис. 108

$$A = F\Delta l \cos \alpha,$$

где α — угол между направлениями вектора силы и перемещения.

При расширении газа сила его давления и перемещение поршня сонаправлены. Следовательно, эта работа положительна ($\cos \alpha = +1$). Поэтому $A = F\Delta l$.

Так как $F = pS$, то

$$A = pS\Delta l,$$

где S — площадь поверхности поршня и p — давление газа. Из рисунка видно, что величина $S\Delta l$ равна изменению объема газа от первоначального значения V_1 до конечного значения V_2 , т. е. $S\Delta l = V_2 - V_1 = \Delta V$. Следовательно,

$$A = p(V_2 - V_1),$$

или

$$A = p\Delta V.$$

(1)

Работа расширения газа равна произведению давления газа на изменение его объема.

Формула (1) позволяет вычислить работу газа не только при расширении его в цилиндре, но и в сосуде любой формы. Из этой формулы также видно, что при расширении газа эта работа положительна, так как в этом случае $\Delta V > 0$.

Если газ сжимается (рис. 108, б), то работа силы, с которой газ действует на поршень, отрицательна ($\Delta V < 0$).

Формула (1) относится к случаю, когда давление газа при его расширении или сжатии остается постоянным (изобарный процесс). График этого процесса (в координатах p, V) изображен на рисунке 109 линией AB .

Из формулы (1) следует, что работа при изобарном расширении численно равна площади фигуры, заштрихованной на рисунке.

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 давление газа изменяется так, как показано на рисунке 110. Выделим на кривой небольшой участок, соответствующий малому изменению объема ΔV , и из концов участка опустим перпендикуляры на ось объемов. Если ΔV достаточно мало, то получившаяся полоска (она на рисунке заштрихована) может счи-

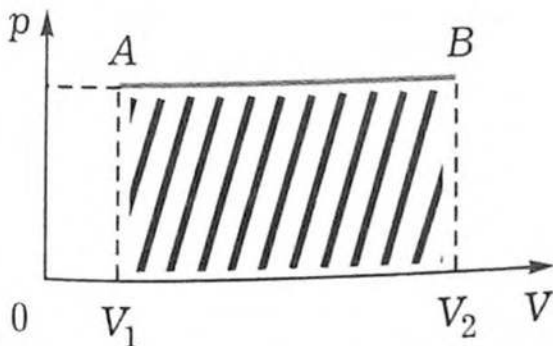


Рис. 109

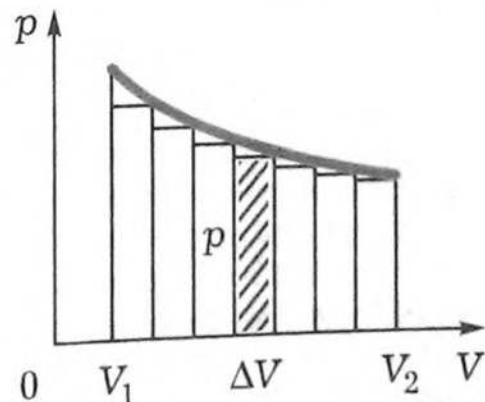


Рис. 110

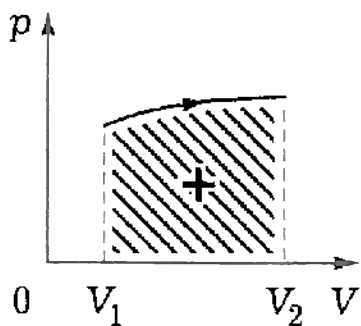


Рис. 111

таться прямоугольником. Площадь его 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 при расширении газа от объема V_1 до объема V_2

(рис. 111). Если газ сжимать вдоль той же кривой, то работа по-прежнему будет определяться площадью фигуры под кривой, но знак ее будет отрицательный.

■ ВОПРОСЫ

1. В каком случае сила упругости сжатого газа (сила давления) совершает работу?
2. По какой формуле вычисляется работа, совершенная постоянной силой давления газа при его расширении или сжатии?
3. Чем различаются работы, совершенные при расширении и сжатии газа?

■ УПРАЖНЕНИЕ 23

1. Воздух занимает объем 20 л при температуре 37 °С. Количество воздуха 1 моль. С помощью поршня его сжимают и одновременно охлаждают, так что давление остается постоянным.

Чему равна работа, совершенная внешней силой при сжатии, если конечный объем газа равен 5 л?

2. Постройте график изотермического процесса по данным таблицы:

V , л	10	15	20	30	40	50	60
p , Па	$6 \cdot 10^6$	$4 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$	$1,5 \cdot 10^6$	$1,2 \cdot 10^6$	10^6

Пользуясь этим графиком, определите работу, совершаемую газом при изменении его объема от 20 до 40 л.

3. Идеальный газ в количестве 1 моль при температуре 300 К занимает объем 10 л. Количество газа 1 моль. Газ изотермически расширяется до объема 27 л. Найдите совершенную при этом работу.

У к а з а н и е. Пользуясь уравнением состояния, постройте на миллиметровой бумаге график зависимости давления от объема и измерьте площадь под кривой.

§ 59

В каких случаях работа, совершенная газом, равна полному изменению его внутренней энергии

Основная задача термодинамики состоит в том, чтобы определить, как получить максимальную работу за счет данного изменения внутренней энергии. Это возможно только при условии, что в процессе расширения газ не соприкасается с телами более низкой температуры, в противном случае часть внутренней энергии газа превратится во внутреннюю энергию более холодного тела, и для совершения работы она будет потеряна. Как можно выполнить это условие?

Работа при адиабатном процессе. Чтобы исключить контакт газа с телами иной температуры, поместим его в цилиндр с поршнем, которые из-

готовлены из теплоизоляционного материала (рис. 112). В этом случае исключен теплообмен газа с окружающей средой. Процесс, протекающий в теле (или системе тел), при котором исключен его теплообмен с окружающей средой, называется *адиабатным*.

Если давление газа в цилиндре выше давления окружающего воздуха, то газ будет расширяться и перемещать поршень. При этом сила, с которой он действует на поршень, совершит положительную работу ($A > 0$). Работу силы, с которой газ действует на поршень, часто называют для краткости работой газа. Тогда согласно закону сохранения энергии внутренняя энергия газа должна уменьшиться — изменение его внутренней энергии отрицательно ($\Delta U < 0$) и равно по модулю работе A :

$$A = -\Delta U. \quad (1)$$

Знак «минус» означает, что, когда газ совершает положительную работу ($A > 0$), его внутренняя энергия уменьшается и газ охлаждается.

Что же произойдет при адиабатном сжатии газа? Прежде всего отметим, что сам по себе газ сжаться не может; сжать газ можно, только действуя на него внешней силой.

Если в адиабатном процессе внешняя сила будет по модулю больше силы давления газа, то он будет сжиматься. Сила давления газа совершит при этом отрицательную работу, так как эта сила направлена в сторону, противоположную перемещению поршня. Как видно из формулы (1), внутренняя энергия газа увеличится и, следовательно, он нагреется.

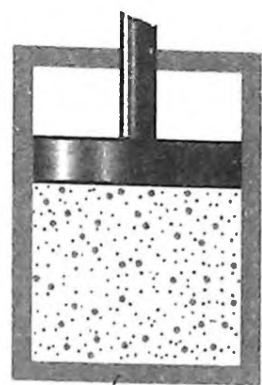
Убедимся на опыте, что при адиабатном сжатии газ нагревается, а при адиабатном расширении охлаждается.

Толстостенный прозрачный цилиндр, в который положен кусочек ваты, закрывают подвижным поршнем (рис. 113). Когда поршень быстро вдвигают внутрь цилиндра, наблюдается вспышка. Это воспламенилась вата вследствие сильного нагревания сжимаемого поршнем воздуха.

Процесс, который совершается при быстром перемещении поршня, близок к адиабатному, даже если газ недостаточно теплоизолирован, так как теплообмен просто не успевает произойти за малое время перемещения поршня.

Работа при изотермическом процессе. Рассмотрим еще один способ получения механической работы за счет внутренней энергии, при котором также исключен контакт газа с телами иной температуры. Это способ *изотермического* расширения газа.

Как осуществить изотермический процесс? Для этого нужно сосуд с поршнем, наполненный нагретым газом, привести в тепловой контакт с термостатом. Напомним (см. § 39), что термостат — это тело настолько большой массы, что оно обеспечивает постоянство температуры газа, даже



Теплоизолятор

Рис. 112



Рис. 113

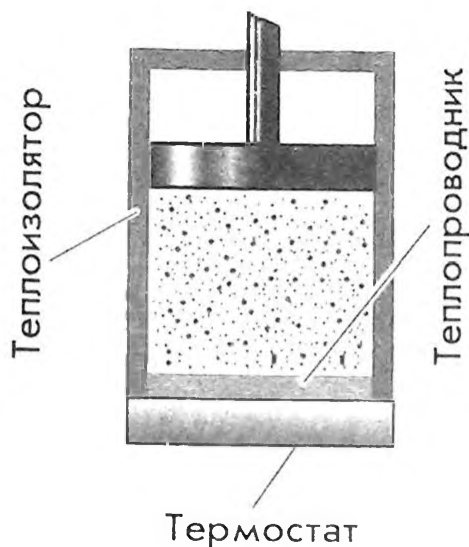


Рис. 114

когда отдает газу или получает от него некоторое количество теплоты (рис. 114). Термостат, от которого газ получает энергию, называют *источником энергии* или *нагревателем*. Рассмотрим случай, когда на поршень действует сжатый газ с силой $\vec{F}_1$, большей по модулю силы внешнего давления $\vec{F}$. Как только под действием этих сил поршень чуть-чуть переместится, температура газа немного понизится. Тотчас же от нагревателя к газу перейдет некоторое количество теплоты, благодаря чему их температуры сравняются. Отдать же какое-либо количество теплоты газ не может, так как он не соприкасается с телами более низкой температуры. Поэтому, несмотря на расширение газа, его температура все время

остается постоянной (равной температуре нагревателя).

При перемещении поршня сила, с которой газ действует на поршень, совершит положительную работу. Но в этом процессе внутренняя энергия газа остается неизменной, так как температура его не изменяется. За счет чего же совершается работа? Очевидно, за счет внутренней энергии нагревателя, от которого газу передается некоторое количество теплоты Q .

По закону сохранения энергии

$$A = Q. \quad (2)$$

При изотермическом сжатии газа под действием внешней силы работа силы, с которой газ действует на поршень, отрицательна. В этом случае некоторое количество теплоты переходит от газа к нагревателю.

Кроме рассмотренных, возможны самые различные процессы расширения газа, например, такой, при котором давление газа остается постоянным (изобарный). Однако только при адиабатном и изотермическом процессах исключен контакт газа с телами иной температуры. Следовательно, исключено изменение внутренней энергии без совершения работы. Поэтому в этих процессах изменение внутренней энергии может быть полностью использовано для совершения работы.

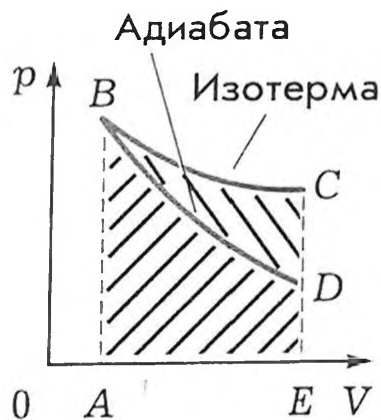


Рис. 115

Как было выяснено, работу, совершаемую газом, можно вычислить по графику зависимости давления газа от его объема. График изотермического процесса представляет собой гиперболу (см. рис. 68). В адиабатном процессе расширения газа его давление уменьшается более резко, так как оно вызвано не только увеличением объема, но и понижением температуры. Для сравнения графики обоих процессов изображены на рисунке 115. Работа газа в этих процессах выражается соответственно площадями фигур $ABCE$ и $ABDE$.

■ ВОПРОСЫ

1. Какой процесс изменения состояния газа называется адиабатным? Как этот процесс может быть осуществлен?
2. Каким способом может быть осуществлен изотермический процесс?
3. Почему в адиабатном процессе давление растет быстрее, чем в изо-

термическом, при уменьшении объема газа на одну и ту же величину? 4. Можно ли сообщить газу некоторое количество теплоты, не вызывая при этом повышение его температуры? 5. Можно ли осуществить изотермическое изменение объема идеального газа без теплообмена? 6. 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 расширении или адиабатном? 7. Как можно осуществить близкое к адиабатному сжатию газа, не изолировав его от окружающей среды? 8. При адиабатном сжатии газа его внутренняя энергия увеличилась на 4,5 кДж. Чему равна работа, совершаемая внешней силой? 9. При резком опускании поршня объем газа в цилиндре уменьшается вдвое. Можно ли утверждать, что давление газа при этом возросло вдвое? Ответ обосновать. 10. Как зависит работа расширения газа в изотермическом процессе от температуры, при которой происходит процесс?

§ 60 Первое начало термодинамики

В предыдущем параграфе было выяснено, что работа газа совершается либо за счет его внутренней энергии ($A = -\Delta U$), либо за счет внутренней энергии нагревателя, передающего газу некоторое количество теплоты ($A = Q$).

Обычно при изменении объема газа работа совершается и за счет передачи ему какого-то количества теплоты от источника энергии, и за счет изменения внутренней энергии самого газа, которая при этом уменьшается. Закон сохранения энергии в этом случае можно записать в виде уравнения

$$A = Q - \Delta U,$$

или

$$Q = A + \Delta U. \quad (1)$$

Отметим, что мы все время пользовались законом сохранения энергии, не сомневаясь в его справедливости и для внутренней энергии так же, как для механической. Но потребовалась огромная экспериментальная работа, чтобы доказать справедливость закона сохранения энергии для тепловых процессов. Закону сохранения энергии, который выражается уравнением (1), было даже присвоено особое название — *первое начало термодинамики*. Его часто называют также первым законом термодинамики. Этот закон формулируется следующим образом:

Количество теплоты, сообщенное телу, равно сумме изменения его внутренней энергии и совершенной им работы.

Если тела представляют собой **изолированную систему**, т. е. они не взаимодействуют с другими телами вне этой системы ($A = 0$), а также не участвуют с ними в теплообмене ($Q = 0$), то изменение внутренней энергии равно нулю ($\Delta U = 0$). Значит, энергия такой системы сохраняется.

При пользовании уравнением (1) надо принимать во внимание знаки входящих в него величин, а именно: работа силы, с которой газ действует на поршень при расширении, положительна ($A > 0$), а при сжатии отрицательна ($A < 0$); количество теплоты, полученное газом, считают положительным ($Q > 0$), а отданное газом — отрицательным ($Q < 0$).

Применяя первый закон термодинамики (1) к различным процессам, мы можем получить важные выводы о связи внутренней энергии, количества теплоты и работы в каждом из этих процессов.

В § 59 мы уже получили такие соотношения для адиабатного и изотермического процессов: в *адиабатном процессе* $A = -\Delta U$; в *изотермическом процессе* $A = Q$.

Эти уравнения являются частными случаями первого закона термодинамики (1).

Рассмотрим процесс, который происходит, когда газ нагревают в закрытом сосуде ($V = \text{const}$). Такой процесс называется *изохорным*. В этом процессе работа не совершается ($A = 0$), так как $\Delta V = 0$. Из первого закона термодинамики следует тогда, что

$$Q = \Delta U,$$

т. е. количество теплоты, сообщенное телу, равно изменению его внутренней энергии. Если газ нагревается, то $Q > 0$ и $\Delta U > 0$ — внутренняя энергия газа увеличивается. При охлаждении газа его внутренняя энергия уменьшается.

В *изобарном процессе* ($p = \text{const}$) работа газа может быть выражена формулой $A = p(V_2 - V_1)$. Поэтому первый закон термодинамики в этом случае может быть записан в виде

$$Q = p(V_2 - V_1) + \Delta U.$$

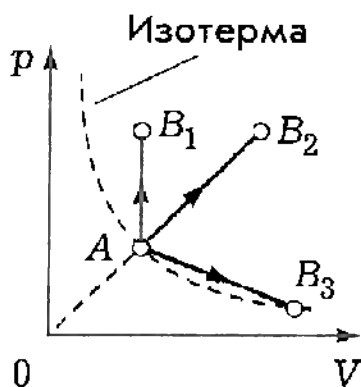


Рис. 116

■ ВОПРОСЫ

1. За счет какой энергии совершается работа при адиабатном расширении газа? 2. За счет какой энергии совершается работа при изотермическом расширении газа? 3. Каково соотношение между полученным от нагревателя количеством теплоты и совершенной механической работой при изотермическом расширении газа? 4. На рисунке 116 изображены графики различных процессов изменения состояния газа: AB_1 , AB_2 , AB_3 . При переходе из первого состояния (A) в одно из последующих (B_1 , B_2 , B_3) газ получает некоторое количество теплоты. Совершает ли газ работу и изменяется ли его внутренняя энергия в каждом из этих процессов?

■ ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

1. При адиабатном расширении газ совершил работу, равную 200 Дж. Чему равно изменение его внутренней энергии? Как изменилась температура газа?

Решение. В адиабатном процессе $A = -\Delta U$. Следовательно, $\Delta U = -A = -200$ Дж.

Знак «минус» означает, что внутренняя энергия газа уменьшилась. Следовательно, температура газа понизилась.

2. При сжатии газа в цилиндре внешняя сила, действующая на поршень, совершает работу, равную 100 Дж. Чему равно изменение внутренней энергии газа, если благодаря теплопроводности цилиндра он отдает в окружающую среду количество теплоты, равное 20 Дж?

Решение. В соответствии с первым началом термодинамики $Q = A + \Delta U$, или $\Delta U = Q - A$.

Так как газ отдает количество теплоты, то Q — величина отрицательная: $Q = -20$ Дж.

Работа силы, с которой газ действует на поршень при сжатии, отрицательна: $A = -100$ Дж.

Следовательно, $\Delta U = -20$ Дж + 100 Дж = 80 Дж.

3. Газ, занимающий объем $V_1 = 0,01 \text{ м}^3$, находится при давлении $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$ и температуре $T_1 = 300 \text{ К}$. Газ нагревают сначала при постоянном объеме до температуры $T_2 = 320 \text{ К}$, а затем при постоянном давлении до температуры $T_3 = 350 \text{ К}$ (рис. 117). Найдите работу, совершенную газом при переходе из состояния 1 в состояние 3.

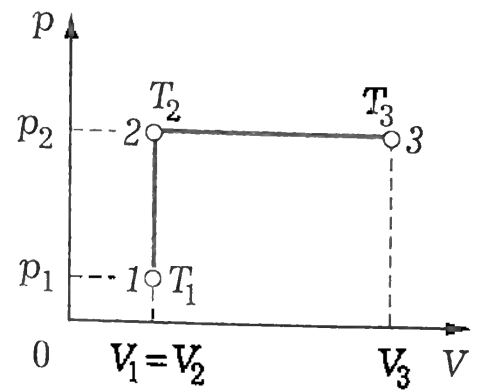


Рис. 117

Решение. Процесс 1—2 совершается при постоянном объеме ($V_2 = V_1$), следовательно, работа в этом процессе равна нулю. Процесс расширения газа 2—3 совершается при постоянном давлении (p_2), и работа в этом процессе равна $A = p_2 (V_3 - V_2)$.

Значит, работа в процессе 1—3 равна $A = p_2 (V_3 - V_2)$.

Неизвестные в этом выражении значения p_2 и V_3 найдем из уравнения состояния газа $pV = \nu RT$.

Для состояний 1 и 2 уравнения состояний имеют вид:

$$p_1 V_1 = \nu R T_1, \quad p_2 V_1 = \nu R T_2,$$

откуда

$$p_2 = \frac{T_2}{T_1} p_1.$$

Для состояний газа 2 и 3 имеем:

$$p_2 V_1 = \nu R T_2, \quad p_2 V_3 = \nu R T_3,$$

откуда

$$\frac{V_3}{V_1} = \frac{T_3}{T_2}, \quad \text{или} \quad V_3 = \frac{T_3}{T_2} V_1.$$

Следовательно,

$$A = p_1 \frac{V_1 (T_3 - T_2)}{T_1}, \quad A = \frac{0,1 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot 0,01 \text{ м}^3 \cdot \text{К}}{300 \text{ К}} = 100 \text{ Дж}.$$

4. Количество идеального одноатомного газа 2 моль. Газ при температуре 0°С сначала изобарно перевели в состояние, в котором его объем в 2 раза больше первоначального, а затем изохорно в состояние, в котором давление в 2 раза больше первоначального. Найдите количество теплоты, переданное газу при его переходе из начального состояния 1 в состояние 3 (рис. 118).

Решение. Искомое количество теплоты находим по первому закону термодинамики:

$$Q = \Delta U + A.$$

Изменение внутренней энергии происходит в обоих процессах — 1—2 и 2—3, так как они оба протекают при повышении температуры газа:

$$\Delta U = \frac{3}{2} \nu R \Delta T.$$

Используя уравнение состояния газа $pV = \nu RT$, найдем изменения температуры в этих процессах.

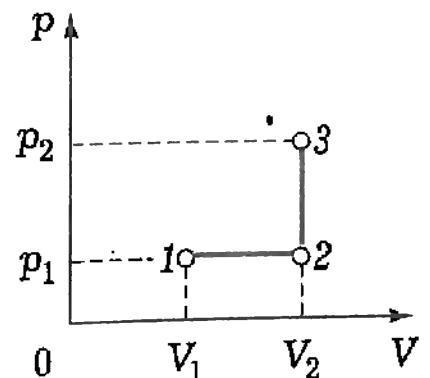


Рис. 118

Для изобарного процесса 1—2: $\frac{V_2}{V_1} = \frac{T_2}{T_1}$, где $V_2 = 2V_1$. Поэтому $T_2 = 2T_1$.

Для изохорного процесса 2—3 запишем:

$$\frac{p_3}{p_1} = \frac{T_3}{T_2},$$

где $p_3 = 2p_1$.

Поэтому $T_3 = 2T_2$, или $T_3 = 4T_1$.

Изменение температуры газа в результате обоих процессов равно

$$\Delta T = T_3 - T_1 = 3T_1.$$

Поэтому изменение внутренней энергии газа равно

$$\Delta U = \frac{3\nu R \cdot 3T_1}{2}; \Delta U = 4,5\nu RT_1.$$

Работа совершается только в изобарном процессе 1—2; она определяется формулой $A = p\Delta V$, где $p = p_1$, а $\Delta V = V_2 - V_1 = V_1$.

Значение $A = p\Delta V$ находим из уравнения состояния газа для состояний 1 и 2:

$$p_1 V_1 = \nu RT_1; p_1 V_2 = \nu RT_2,$$

откуда $p_1 (V_2 - V_1) = \nu R (T_2 - T_1)$, или $A = p_1 (V_2 - V_1) = \nu RT_1$.

Значит, $Q = 4,5\nu RT_1 + \nu RT_1 = 5,5\nu RT_1$;

$$Q = 5,5 \cdot 2 \text{ моль} \cdot 8,31 \frac{\text{Дж} \cdot 273 \text{ К}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \approx 25 \text{ кДж}.$$

■ УПРАЖНЕНИЕ 24

1. Газу, находящемуся в цилиндре с подвижным поршнем, при его нагревании было передано количество теплоты, равное 100 Дж. При этом газ, расширяясь, совершил работу 70 Дж. Чему равно изменение внутренней энергии газа?
2. По условию задачи 3 (см. с. 145) вычислите количество теплоты, полученное газом в процессах 1—2—3 (см. рис. 117), если количество газа $\nu = 0,4$ моль.
3. Одноатомный газ находится в цилиндре с подвижным поршнем под атмосферным давлением. Количество газа 2 моль. В процессе нагревания температура повысилась от 20 до 70 °С. Какое количество теплоты передано газу?
4. Одноатомный идеальный газ, имевший температуру 0 °С, нагревается при постоянном давлении. Количество газа 1 моль. Какое количество теплоты необходимо сообщить газу, чтобы его объем удвоился? Какая работа будет при этом совершена?

§ 61 Теплостоекость вещества

Из первого закона термодинамики следует, что если над телом не совершается работа, то внутренняя энергия этого тела изменяется только за счет теплопередачи, т. е. сообщения ему некоторого количества теплоты.

Как измерить количество теплоты Q , сообщенное телу?

Напомним (VIII класс), что

$$Q = cm\Delta t,$$

где c — удельная теплоемкость вещества, m — масса тела, Δt — разность между конечной и начальной температурами тела.

Удельная теплоемкость вещества определяется количеством теплоты, необходимым для нагревания вещества массой 1 кг на 1 °C (1 К):

$$c = \frac{Q}{m\Delta t}.$$

Единица удельной теплоемкости $1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}} \left(1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right).$

Удельные теплоемкости различных веществ существенно различны. У металлов, например, они значительно меньше, чем у воды.

Но только ли от рода вещества зависит удельная теплоемкость?

Теплоемкость газа при постоянном объеме. Из первого закона термодинамики легко сделать вывод о том, что удельная теплоемкость зависит от того, как происходит нагревание, т. е. от вида процесса изменения состояния тела. Причем эта зависимость особенно заметна для газов.

Температура изменяется, но работа не совершается. Представим себе, что идеальный газ нагревается в замкнутом сосуде с закрепленным поршнем, т. е. объем газа не изменяется ($V = \text{const}$). Значит, работа газа в таком процессе (изохорном) не совершается: $A = 0$. Тогда все сообщенное газу количество теплоты идет только на увеличение внутренней энергии газа:

$$Q = \Delta U.$$

Температура газа возрастает при этом пропорционально внутренней энергии. Обозначив удельную теплоемкость газа в этом процессе через c_V , получим:

$$c_V = \frac{Q}{m\Delta t} \quad \text{или} \quad c_V = \frac{\Delta U}{m\Delta T}.$$

Для газов чаще всего пользуются понятием не удельной, а молярной теплоемкости. *Молярная теплоемкость газа* определяется количеством теплоты, необходимым для нагревания 1 моль газа на 1 °C (1 К). Молярная теплоемкость обозначается $C_{\text{моль}}$ или просто C . Тогда

$$C_V = \frac{Q}{\nu\Delta t}, \quad \text{или} \quad C_V = \frac{\Delta U}{\nu\Delta T}, \quad (1)$$

где ν — количество вещества.

Удобство применения молярной теплоемкости объясняется тем, что 1 моль значительно разреженного (идеального) одноатомного газа содержит одинаковое число частиц, внутренняя энергия которых складывается из кинетических энергий всех частиц.

Она может быть вычислена как произведение **средней кинетической** энергии теплового поступательного движения молекулы $\left(\frac{m_0 v^2}{2} = \frac{3}{2} kT \right)$ на число молекул N :

$$U = \frac{3}{2} NkT, \quad \text{или} \quad U = \frac{3}{2} \nu N_A kT.$$

Напомним, что $N_A k = R$. Поэтому

$$U = \frac{3}{2} \nu RT.$$

Мы видим, что внутренняя энергия **идеального** газа пропорциональна абсолютной температуре, числу частиц и **не зависит** от их массы. Из этого

следует, что молярная теплоемкость идеального одноатомного газа в изохорном процессе (C_V), определяемая формулой (1), одинакова для всех газов.

Рассчитаем ее. Изменение внутренней энергии при изменении температуры газа на ΔT равно

$$\Delta U = \frac{3}{2} \nu R \Delta T.$$

Значит,
$$C_V = \frac{3\nu R \Delta T}{2\nu \Delta T} = \frac{3}{2} R. \quad (2)$$

Так как $R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$, то

$$C_V \approx 12,5 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}.$$

При изменении температуры совершается работа. Рассмотрим другой из известных нам изопроцессов — изобарный. Для его осуществления предоставляют газу возможность при нагревании свободно расширяться (поршень не закреплен). В этом случае давление газа остается постоянным ($p = \text{const}$), равным внешнему давлению на газ. Тогда

$$Q = \Delta U + A, \quad \text{или} \quad Q = \Delta U + p\Delta V,$$

т. е. количество теплоты Q идет не только на увеличение внутренней энергии газа и соответствующее ей повышение температуры, но и на совершение работы¹. Следовательно, для повышения температуры газа на 1 К в таком процессе придется сообщить газу большее количество теплоты, чем в изохорном процессе. Поэтому молярная теплоемкость газа при его изобарном нагревании больше, чем при изохорном.

Обозначим молярную теплоемкость газа при изобарном его нагревании через C_p :

$$C_p = \frac{Q}{\nu \Delta T} = \frac{\Delta U}{\nu \Delta T} + \frac{p\Delta V}{\nu \Delta T}.$$

Принимая во внимание (1), получим:

$$\boxed{C_p = C_V + \frac{p\Delta V}{\nu \Delta T}}. \quad (3)$$

Значит, молярная теплоемкость газа при постоянном давлении больше молярной теплоемкости газа при постоянном объеме на величину

$$\frac{p\Delta V}{\nu \Delta T}.$$

Физический смысл универсальной газовой постоянной. Напомним, что параметры идеального газа p , V , T связаны уравнением

$$pV = \nu RT.$$

Если газ расширяется при постоянном давлении, то

$$p\Delta V = \nu R \Delta T,$$

¹ Заметим, что внутренняя энергия идеального газа от объема не зависит. Поэтому на изменение внутренней энергии газа в этом процессе расходуется такое же количество теплоты, как и в изохорном процессе.

откуда

$$\frac{p\Delta V}{\nu\Delta T} = R. \quad (4)$$

Из выражения (4) следует, что **универсальная газовая постоянная** R равна работе расширения 1 моль газа при нагревании на 1 К.

Таким образом, мы получаем, что

$$C_p = C_v + R, \quad \text{или} \quad C_p - C_v = R. \quad (5)$$

Соотношение между удельной и молярной теплоемкостью газа. Удельная теплоемкость газа и его молярная теплоемкость связаны между собой. Напомним, что удельная теплоемкость газа в изохорном процессе $c_v = \frac{\Delta U}{m \cdot \Delta T}$. Так как $m = \nu M$, где M — молярная масса, то $c_v = \frac{\Delta U}{\nu M \Delta T}$. Но $\frac{\Delta U}{\nu \Delta T} = C_v$. Поэтому

$$c_v = \frac{C_v}{M}. \quad (6)$$

Теплоемкость многоатомных газов. Численные значения удельной теплоемкости различных газов получают в эксперименте, путем измерений, в отличие от молярной теплоемкости газа, которую рассчитывают на основе молекулярно-кинетической теории.

Формула (6) показывает, что и удельную теплоемкость можно рассчитывать, если справедливо для нее значение молярной теплоемкости C_v , которое дает теория.

Сравнение *экспериментальных* и *расчетных* значений удельной теплоемкости различных газов показало, что они достаточно точно совпадают только для *одноатомных* газов (гелий, неон, аргон, криптон и др.) и паров некоторых металлов. Это подтверждает вывод теории о том, что у этих газов молярная теплоемкость C_v одинакова, ее значение $\approx 12,5 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$.

Но уже для азота (N_2), кислорода (O_2) и ряда других двухатомных газов измерения показали значительно большее значение удельной, а следовательно, и молярной теплоемкости:

$$C_v \approx 20 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}.$$

Еще большей оказалась молярная теплоемкость многоатомных газов (NH_3 , CH_4 и т. д.):

$$C_v \approx 25 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}.$$

Расхождения между экспериментальными и расчетными значениями теплоемкости доказали необходимость введения поправок в теорию теплоемкости.

Эти поправки касались основного положения теории о возможности рассматривать молекулы всех газов как материальные точки, совершающие только хаотические поступательные движения. Оказалось, что это справедливо только для одноатомных газов.

Уже для двухатомных газов **нельзя пренебрегать** некоторой протяженностью молекул, два атома которых благодаря взаимодействию сохраняют между собой некоторое расстояние. А это означает, что для таких и других

многоатомных молекул возможны не только поступательные, но и вращательные движения вокруг осей, проходящих через их центр масс.

Поэтому в расчетах внутренней энергии многоатомных газов (а следовательно, и их молярной теплоемкости) должна быть поправка, учитывающая также кинетическую энергию вращательного движения молекул.

Поправки в расчетах теплоемкостей, которые мы здесь не приводим¹, дали возможность получить значения молярной теплоемкости двухатомных и многоатомных газов, которые находятся в близком соответствии с опытом.

Однако выявленные экспериментальные факты, показывающие изменения молярных теплоемкостей двух- и многоатомных газов при очень низких и очень высоких температурах, не могли быть объяснены на основе законов классической физики.

Более полная и точная теория теплоемкости была создана лишь на основе квантовых представлений в современной физике.

■ УПРАЖНЕНИЕ 25

1. Вычислите молярную теплоемкость одноатомного газа для процесса, происходящего при постоянном давлении.
2. Какое количество теплоты необходимо, чтобы нагреть одноатомный газ в количестве 5 моль от 20 до 100 °C: а) в закрытом сосуде; б) в сосуде с подвижным поршнем?

§ 62 Необратимость процессов в природе

Первый закон термодинамики налагает определенные ограничения на возможность осуществления тех или иных процессов. А именно: он показывает, что в изолированной системе возможны лишь такие процессы, при которых *энергия сохраняется*. Однако не всякий процесс, который не противоречит первому закону термодинамики, действительно происходит.

В самом деле, представим себе, что в калориметр с холодной водой опустили горячее тело. Если бы при этом холодная вода остыла и выделила некоторое количество теплоты, а горячее тело получило бы это количество теплоты и еще больше нагрелось, то такое явление не противоречило бы первому закону термодинамики: баланс энергий был бы соблюден. Но такого процесса в природе никогда не бывает. Процессы теплообмена между телами, предоставленными самим себе, всегда происходят так, что горячие тела охлаждаются, передавая энергию менее нагретым телам, температура которых повышается. Этот процесс происходит до тех пор, пока температуры тел не сравняются — в системе тел установится тепловое равновесие.

Выше мы ознакомились еще с одним процессом, 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 потеряет некоторую энергию.

¹ Эти расчеты требуют более полного знания ряда вопросов механики.

Процессы, обратные которым самопроизвольно не происходят, называются *необратимыми*.

Явление диффузии — это также пример **необратимого** процесса. Если в сосуде находятся два различных газа, разделенные перегородкой, то после удаления перегородки начнется диффузия, **в результате которой** установится равновесие — концентрация каждого из газов в любом **месте** сосуда окажется одинаковой. Обратный процесс — самопроизвольное разделение смеси газов — никогда не происходит.

Лишь чисто механические движения, т. е. движения, происходящие без трения, обратимы. Например, колебания маятника в вакууме и при **отсутствии** трения в подвесе обратимы: и в прямом и в обратном направлении маятник самопроизвольно сколь угодно долго движется с одинаковой амплитудой, проходя через одни и те же промежуточные состояния.

Реальные процессы в природе, в частности движения тел, протекающие с трением, необратимы.

Колебания того же маятника, но происходящие при наличии трения, будут затухающими, и маятник остановится. В этом случае механическая энергия маятника убывает, а температура его и окружающей среды повышается, т. е. увеличивается внутренняя энергия этих тел.

Приведенные примеры показывают, что у процессов, происходящих в природе, имеется естественный ход — к установлению равновесного состояния.

■ ВОПРОСЫ

1. В одной половине сосуда, разделенного перегородкой, заключен идеальный газ, а в другой создан вакуум. Что произойдет с газом, если перегородку удалить? Вернется ли газ самопроизвольно через некоторое время в одну половину сосуда? 2. При каких условиях падение шарика на опору будет обратимым процессом?

§ 63 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 (рис. 119), а в другой половине создан вакуум. Если убрать заслонку, то газ займет весь объем сосуда и плотность его станет по всему объему одинаковой. Одинаковыми станут также давление и температура газа во всех частях сосуда. Система придет в равновесное состояние. После этого 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.

Сколько бы времени мы ни наблюдали в дальнейшем за газом, нам не удастся обнаружить состояние, при котором все молекулы газа собрались бы вновь в левой половине сосуда. Это говорит о том, что расширение газа в пустоту — процесс необратимый. Разумеется, несамопроизвольно, под действием внешней силы, молекулы газа могут собраться в одной половине сосуда. Например, если вместо пра-

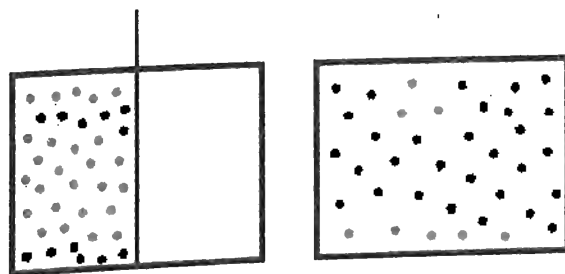


Рис. 119

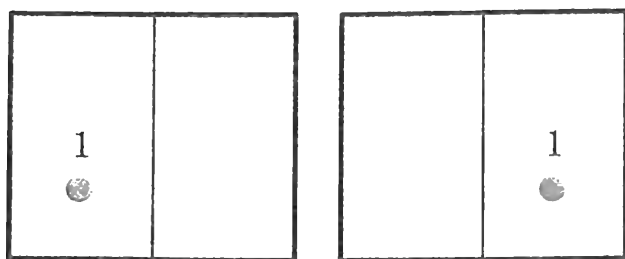


Рис. 120

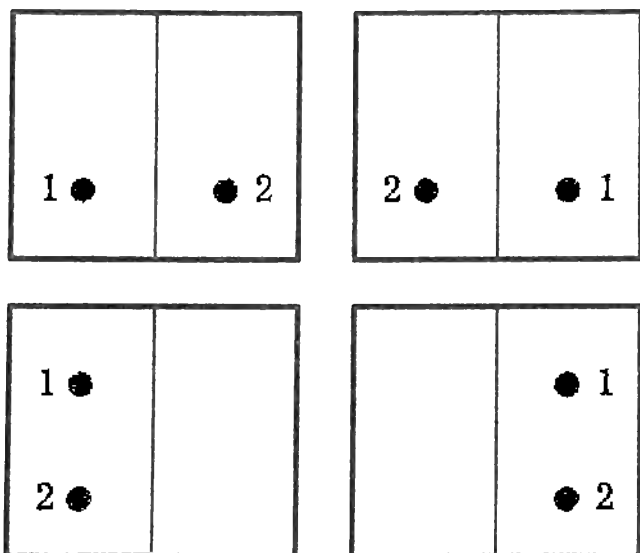


Рис. 121

вой 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 окажутся в одной половине сосуда? Все дело в том, что газ состоит из огромного числа молекул.

Рассмотрим, что было бы, если бы частиц было немного. Как они могли бы распределиться между половинами сосуда?

Если в сосуде одна молекула, то число различных способов ее распределения между половинами сосуда $N = 2$ — она находится либо в одной, либо в другой половине сосуда (рис. 120). Из этих двух возможностей, например, нахождению частицы в левой половине сосуда соответствует один способ.

В случае двух частиц (рис. 121) общее число возможных распределений между частями сосуда $N = 4$, т. е. 2^2 . Но существует только один случай, когда все частицы находятся в левой

части сосуда, и два случая ($Z = 2$), когда частицы распределены поровну между частями сосуда.

Мы не случайно пронумеровали частицы. Это позволило в предыдущем примере учесть для одинакового числа частиц в каждой половине сосуда два способа распределения. Поэтому, подсчитывая в дальнейшем общее число возможных способов размещения частиц между половинами сосуда, надо каждую частицу отметить своим номером. Для случаев, когда число частиц равно 3, 4 и 5, аналогичные подсчеты дают следующие результаты: общее число размещений (N) соответственно равно 2^3 , 2^4 и 2^5 , но по-прежнему только в одном случае из всех возможных способов размещения все частицы будут в левой половине сосуда.

Чтобы получить общий вывод, рассмотрим еще два случая — с 6 и 10 частицами. Для 6 частиц ($n = 6$) число способов размещения $N = 64 = 2^6$ (рис. 122). Но по-прежнему только в одном случае из 64 все частицы соберутся в левой половине, а число способов равномерного распределения частиц по обеим половинам сосуда равно $Z = 20$, т. е. в 20 раз больше.

Для 10 частиц ($n = 10$) общее число возможных распределений настолько велико, что изобразить его, как это было сделано для 6 частиц, уже невозможно даже на двух страницах учебника. Поэтому приводим таблицу с результатами аналогичных расчетов для 10 частиц.

Общее число способов размещения для данного случая $N = 1024 = 2^{10}$. Но, как и в предыдущих случаях, есть только один из способов, когда все частицы размещены в левой половине сосуда, и 252 способа, когда они распределены равномерно по обеим половинам сосуда.

1	2	3	6
4	4	5	

2	3	4	6
1	5	5	

1	2	3	6
4	4	5	

2	1	3	6
4	4	5	

1	2	3	6
4	4	5	

1	2	3	6
4	4	5	

2	1	3	6
4	4	5	

1	2	3	6
4	4	5	

1	2	3	6
4	4	5	

2	1	3	6
4	4	5	

1	2	3	6
4	4	5	

1	2	3	6
4	4	5	

2	1	3	6
4	4	5	

1	2	3	6
4	4	5	

1	2	3	6
4	4	5	

3	1	4	6
2	2	5	

1	2	3	6
4	4	5	

1	2	3	6
4	4	5	

1	2	3	6
4	4	5	

1	2	3	6
4	4	5	

1	2	3	6
4	4	5	

1	2	3	6
4	4	5	

1	2	3	6
4	4	5	

1
2
3
4
5
6

1
2
3
4
5
6

1
2
3
4
5
6

1
2
3
4
5
6

1
2
3
4
5
6

1
2
3
4
5
6

1
2
3
4
5
6

1
2
3
4
5
6

1
2
3
4
5
6

1
2
3
4
5
6

1
2
3
4
5
6

1
2
3
4
5
6

1
2
3
4
5
6

1
2
3
4
5
6

1
2
3
4
5
6

1
2
3
4
5
6

1
2
3
4
5
6

1
2
3
4
5
6

1
2
3
4
5
6

1
2
3
4
5
6

1
2
3
4
5
6

1
2
3
4
5
6

1
2
3
4
5
6

1
2
3
4
5
6

1
2
3
4
5
6

1
2
3
4
5
6

1
2
3
4
5
6

1
2
3
4
5
6

1
2
3
4
5
6

1
2
3
4
5
6

1
2
3
4
5
6

1
2
3
4
5
6

1
2
3
4
5
6

1
2
3
4
5
6

1
2
3
4
5
6

1
2
3
4
5
6

1
2
3
4
5
6

1
2
3
4
5
6

1
2
3
4
5
6

1
2
3
4
5
6

1
2
3
4
5
6

1
2
3
4
5
6

1
2
3
4
5
6

1
2
3
4
5
6

Слева	Справа	Число способов распределения
0	10	1
1	9	10
2	8	45
3	7	120
4	6	210
5	5	252
6	4	210
7	3	120
8	2	45
9	1	10
10	0	1
		Итого 1024

Обобщая рассмотренные случаи для n частиц, 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 левой 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. Представим себе, что 64 возможных размещения 6 частиц по двум половинам сосуда были бы изображены на отдельных карточках, на ко-

торых расставлены номера этих карточек — с 1-го по 64-й. Поместив эти карточки в коробку, будем вытаскивать их по одной. Каждый раз, прежде чем вытащить очередную карточку, ранее вынутую, будем класть обратно в коробку, чтобы перед каждым очередным вытаскиванием в коробке были все 64 карточки. Зададимся вопросом: какие карточки при этом будут попадаться чаще: такие, на которых изображены частицы, равномерно распределенные по обеим половинам карточки, или та, на которой изображены все они в левой половине карточки (карточка № 1)?

Очевидно, чаще будут попадаться карточки с изображением равномерного распределения частиц по половинам карточки, так как их в коробке 20 штук (номера с 23-го по 42-й). И значительно реже будет попадаться карточка, где все частицы будут изображены в левой части, так как в коробке такая карточка только одна (№ 1).

Вынимая карточки, мы заранее не знаем, какая из них попадется. В таких случаях говорят, что появление той или иной карточки — событие случайное. Для оценки случайных событий применяется понятие вероятности. В нашем случае можно сказать, что появление какой-то определенной, заранее задуманной карточки при вытаскивании их из коробки — событие маловероятное (такая карточка только одна), а появление одной из карточек с равномерным распределением частиц — событие более вероятное (их 20).

Вероятность какого-либо случайного события определяется как отношение числа Z случаев, соответствующих наступлению ожидаемого события, к общему числу N возможных случаев, если все случаи равновозможны.

Значит, формула для определения вероятности имеет следующий вид:

$$P = \frac{Z}{N},$$

где Z — число случаев, когда ожидаемое событие происходит, а N — общее число возможных случаев.

Теперь мы можем количественно охарактеризовать вероятность появления той или иной карточки. Например, для карточки № 6 вероятность $P = \frac{1}{64}$, а для любой карточки с равномерным распределением (№ 23—42) вероятность $P = \frac{20}{64}$, т. е. в 20 раз больше.

Вернемся теперь к размещению молекул газа **между** двумя половинами сосуда. Как известно, число молекул газа, содержащихся, например, в одном моле, огромно, оно равно примерно $6 \cdot 10^{23}$. В этом случае общее число возможных размещений молекул по обеим половинам сосуда $N = 2^{6 \cdot 10^{23}}$. Это невообразимо большое число. И только в одном из этих случаев все молекулы снова соберутся в левой части сосуда. Значит, вероятность такого события равна

$$P = \frac{1}{2^{6 \cdot 10^{23}}}.$$

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 распределению молекул по всему объему сосуда. Поэтому вероятность такого события максимальна, и практически именно оно всегда наблюдается. Значит, равновесные состояния системы являются наиболее вероятными. Вот почему газ самопроизвольно никогда не собирается в одной половине сосуда, так как это был бы переход от более вероятного состояния к состоянию, вероятность которого ничтожно мала.

Аналогично объясняются и другие необратимые процессы, такие как диффузия, переход энергии от горячего тела к холодному, превращение механической энергии во внутреннюю и т. п. Необратимые процессы происходят также при работе тепловых двигателей.

§ 64 Циклические тепловые двигатели

В современной технике механическую энергию получают главным образом за счет внутренней энергии. Устройства, в которых происходит такое преобразование энергии, называются *тепловыми двигателями*. Источником энергии для них служит топливо.

В рассмотренных выше способах преобразования внутренней энергии в механическую (см. § 58) работа совершалась благодаря расширению газа, перемещающего поршень.

Газ, расширение которого вызывает перемещение поршня в цилиндре двигателя, 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, а следовательно, газ в цилиндре перестанет совершать работу.

Работа при циклическом процессе. Для того чтобы работа двигателя не сводилась к однократному расширению газа, необходимо путем сжатия вернуть газ в исходное состояние. 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 на его устройстве (напомним, что в VIII классе устройство двигателя рассматривалось).

В таком двигателе газ (рабочее тело) давит на поршень, который перемещается в цилиндре, как, например, в автомобильном двигателе.

Когда газ расширяется, он движет поршень. Движение поршня передается валу двигателя, маховому колесу или другим механизмам, приобретающим при этом кинетическую энергию. Для сжатия газа поршень должен переместиться в противоположном направлении. Это движение совершается за счет энергии, запасенной маховиком или другими механизмами в процессе расширения газа.

Если работа, совершаемая при сжатии газа под действием внешней силы, будет по абсолютному значению равна работе его расширения, то общая работа за цикл будет равна нулю. Отсюда следует, что если мы хотим получить полезную работу, то необходимо сделать работу сжатия газа меньше работы расширения.

Нагреватель, рабочее тело и холодильник — основные части теплового двигателя. Для того чтобы работа при сжатии была по абсолютному значению меньше работы расширения, нужно, чтобы каждому значению объема при сжатии соответствовало меньшее давление, чем при расширении. Как это можно осуществить?

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. Значит, для работы циклического теплового двигателя, кроме нагревателя и рабочего тела, необходим еще и холодильник.

На рисунке 123 изображены графически процессы расширения газа (линия AB) и сжатия до первоначального объема (линия CD).

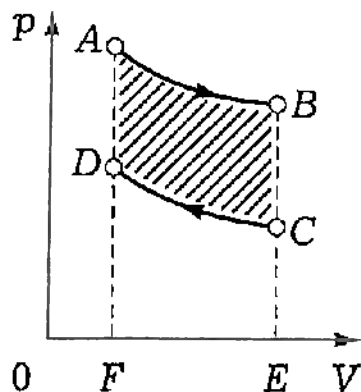


Рис. 123

Работа газа в процессе расширения положительна ($\Delta V > 0$) и численно равна площади фигуры $ABEF$. Работа газа при сжатии отрицательна ($\Delta V < 0$) и численно равна площади фигуры $CDFE$.

Полезная работа за этот цикл получается равной (численно) разности площадей под кривыми AB и CD (заштриховано на рисунке).

Таким образом, мы выяснили, что для получения при циклическом процессе полезной механической работы сжатие газа (рабочего тела) должно происходить при более низкой температуре, чем расширение. Так как газ перед сжатием охлаждают, то он отдает холодильнику некоторое количество теплоты Q_2 из того количества теплоты Q_1 , которое получает при расширении от нагревателя.

В любом из двигателей всегда можно найти нагреватель, холодильник и рабочее тело. Схематически это показано на рисунке 124.

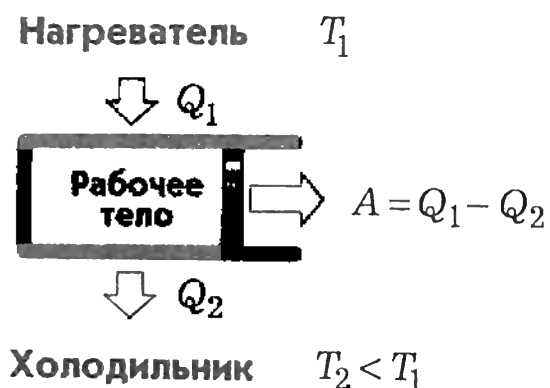


Рис. 124

Второй закон термодинамики. Главная особенность теплового двигателя состоит в том, что рабочее тело в нем получает некоторое количество теплоты от нагревателя, но обязательно отдает часть этой теплоты холодильнику.

Значит, количество теплоты, заимствованной от источника теплоты (нагревателя), не может быть целиком преобразовано в механическую работу циклически действующей тепловой машины. Это утверждение представляет собой важный закон природы, получивший название *второго закона термодинамики*. Он формулируется следующим образом:

В циклически действующей тепловой машине невозможно преобразовать в механическую работу все количество теплоты, полученное от нагревателя.

Во втором законе термодинамики получила отражение необратимость процессов в природе.

В самом деле, если бы количество теплоты Q_2 самопроизвольно переходило обратно от холодильника к нагревателю, то работа могла бы быть совершена за счет всего количества теплоты Q_1 , полученного от нагревателя. Однако количество теплоты от холодного тела к горячему самопроизвольно никогда не переходит (см. § 62). Значит, невозможность получения работы за счет всего количества теплоты, заимствованной от нагревателя, связана с необратимостью тепловых процессов.

Разумеется, совершая работу за счет внешнего источника энергии, можно отбирать энергию у холодного тела и передавать ее горячему. Это, например, происходит в бытовых и промышленных холодильниках, где такой процесс совершается за счет электрической энергии.

Особенность использования внутренней энергии позволяет понять, почему некоторые источники энергии, находящиеся вокруг нас, бесполезны. Очевидно, не может быть использована энергия таких тел, температура которых равна температуре окружающей среды. Насколько заманчивым кажется использование почти безграничного запаса внутренней энергии, содержащейся в атмосфере и в водах океанов! Однако 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.

❑ ВОПРОСЫ

1. Газ расширяется самопроизвольно. Может ли происходить самопроизвольное сжатие газа? 2. Почему работа теплового двигателя должна состоять из повторяющихся циклов расширения и сжатия газа? 3. Почему перед очередным сжатием газа он должен быть охлажден? 4. Из каких основных частей состоит любой тепловой двигатель?

§ 65 Коэффициент полезного действия тепловой машины

Мы выяснили, что в циклически действующей тепловой машине рабочее тело, получив некоторое количество теплоты Q_1 от нагревателя, не может полностью его использовать для совершения работы. Некоторое количество теплоты Q_2 переходит в холодильник. Таким образом, совершаемая работа равна $A = |Q_1| - |Q_2|$. Отношение этой работы к количеству

теплоты, полученной расширяющимся газом от нагревателя, называется коэффициентом полезного действия тепловой машины η :

$$\eta = \frac{A}{|Q_1|}, \quad \text{или} \quad \boxed{\eta = \frac{|Q_1| - |Q_2|}{|Q_1|}}. \quad (1)$$

Коэффициент полезного действия тепловой машины всегда меньше единицы.

Задача теплоэнергетики состоит в том, чтобы сделать КПД как можно более высоким, т. е. использовать для получения работы как можно большую часть теплоты, заимствованной от нагревателя. Как это можно сделать?

Тепловая машина с наибольшим КПД. Мы знаем, что для совершения циклического процесса, кроме рабочего тела, необходим нагреватель и холодильник. Расширение газа должно происходить при температуре нагревателя, а сжатие — при температуре холодильника.

Но, с другой стороны, надо помнить, что для получения максимальной работы за счет внутренней энергии газа недопустимо его соприкосновение с телом, температура которого отличается от температуры самого газа. Ведь при соприкосновении двух тел с различными температурами часть внутренней энергии более нагретого тела необратимо перейдет к более холодному без совершения механической работы (см. § 57). Рабочее тело как раз и разделяет нагреватель и холодильник.

Расширение рабочего тела (газа) должно происходить изотермически, т. е. при его контакте с нагревателем. Но далее, перед сжатием, газ должен быть охлажден. Как можно это сделать, не приводя газ в контакт с холодным телом?

Напомним, что охлаждение газа без его соприкосновения с холодным телом может происходить при адиабатном расширении, а нагревание — при адиабатном сжатии. Поэтому изотермическое расширение газа при температуре нагревателя T_1 (рис. 125, линия

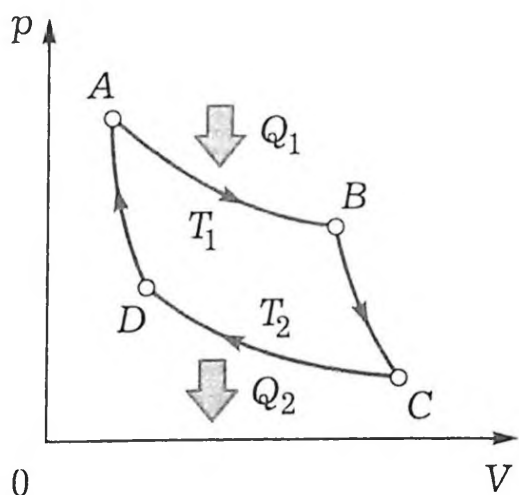
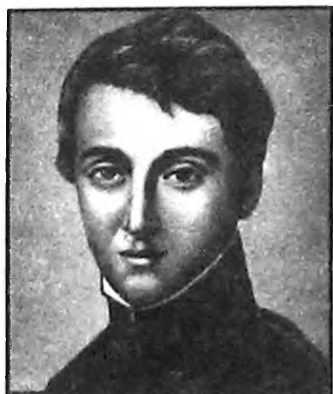


Рис. 125



Карно
Сади
(1796—1832)

AB) должно завершиться адиабатным расширением, при котором температура газа понижается до температуры холодильника T_2 (линия BC). Далее изотермическое сжатие, происходящее при температуре холодильника T_2 (линия CD), должно завершиться адиабатным сжатием, при котором газ нагревается до температуры T_1 (линия DA).

Цикл, состоящий из изотермических и адиабатных процессов, был впервые предложен французским инженером и ученым Сади Карно.

В этом цикле исключен контакт тел разной температуры. Следовательно, в нем теплопередача всегда связана с изменением объема газа, а значит, с соверше-

нием работы. Поэтому цикл Карно — самый эффективный из всех возможных при данной разности температур нагревателя и холодильника.

Максимальный коэффициент полезного действия двигателя, в котором устранены любые потери, кроме передачи энергии холодильнику, как показал Сади Карно, равен

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}, \quad (2)$$

где T_1 и T_2 — температуры соответственно нагревателя и холодильника.

Из этой формулы видно, что КПД увеличивается при повышении температуры нагревателя и при понижении температуры холодильника. Основным способом повышения КПД тепловых двигателей состоит в повышении температуры нагревателя, так как холодильником в большинстве случаев служит просто окружающая среда. Температура пара в котле (нагреватель) достигает 875 К, а в газовых турбинах — 1100 К. Дальнейшее повышение температуры ограничивается отсутствием достаточно жаростойких материалов.

Рассмотренный нами цикл Карно представляет собой идеальный цикл. Реальные тепловые двигатели действуют не по циклу Карно. Кроме того, у двигателей существуют дополнительные потери. Поэтому достигаемый на практике КПД тепловых двигателей всегда меньше вычисленного по формуле (2). Даже в самых лучших тепловых двигателях он не превышает 50%, а во многих случаях — значительно меньше.

■ ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

В цилиндре тепловой машины находится идеальный одноатомный газ. Количество газа 1 моль. Определите КПД тепловой машины, если изменение состояния газа в цилиндре происходит по циклу, показанному на рисунке 126.

Решение. $\eta = \frac{A}{Q_1}$, где A — полезная работа за цикл. В данном случае (см. рис. 126) $A = p_0 V_0$.

Количество теплоты Q_1 газ получает в процессах AB и BC , когда его температура повышается:

$$Q_1 = \nu C_V (T_B - T_A) + \nu C_p (T_C - T_B),$$

где C_V и C_p — молярные теплоемкости соответственно при $V = \text{const}$ и $p = \text{const}$: $C_V = \frac{3}{2} R$ и $C_p = \frac{3}{2} R + R$.

Разность температур в точках A , B и C находим из уравнения состояния газа для этих точек:

$$p_0 V_0 = RT_A; \quad 2p_0 V_0 = RT_B; \quad 4p_0 V_0 = RT_C.$$

Отсюда

$$T_B = 2T_A \quad \text{и} \quad T_C = 4T_A.$$

Следовательно,

$$T_B - T_A = T_A; \quad T_C - T_B = 2T_A.$$

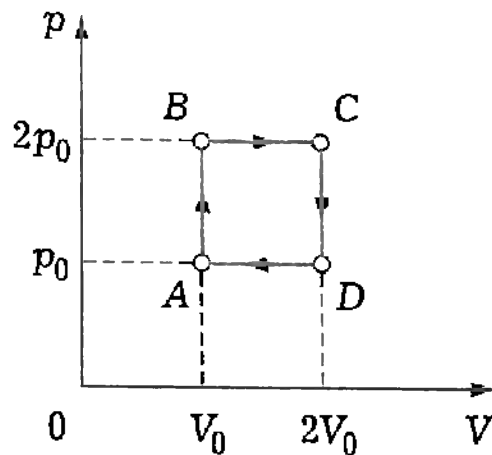


Рис. 126

Тогда

$$Q_1 = \frac{3}{2} R \cdot T_A + \frac{5}{2} R \cdot 2T_A = 6,5RT_A;$$

$$\eta = \frac{p_0 V_0}{6,5RT_A} = \frac{p_0 V_0}{6,5p_0 V_0} \approx 0,15.$$

■ УПРАЖНЕНИЕ 26

1. Идеальный тепловой двигатель получает от нагревателя каждую секунду количество теплоты, равное $3,6 \cdot 10^4$ Дж, и за то же время отдает холодильнику $3,2 \cdot 10^4$ Дж. Каков КПД двигателя?
2. Горячий пар поступает в турбину при температуре 600°C , а выходит при температуре 40°C . Считая паровую машину идеальной, определите верхний предел ее коэффициента полезного действия.
3. Температура нагревателя 520°C , а холодильника 20°C . Какую работу совершила машина, получив от нагревателя количество теплоты, равное 10^7 Дж? Считайте машину идеальной.
4. Восходящий от поверхности Земли поток воздуха представляет собой своеобразный тепловой двигатель. Укажите в нем основные части, присущие каждому тепловому двигателю.

§ 66 Холодильные машины

Любой тепловой двигатель «забирает» некоторое количество теплоты Q_1 от нагревателя и, совершая цикл расширения и сжатия, передает часть этой теплоты Q_2 холодильнику, нагревая его. Поэтому, например, в непосредственной близости от выхлопной трубы двигателя воздух (холодильник) нагревается.

Зададим вопрос: что произойдет, если в тепловой машине цикл ее работы провести в обратном направлении?

Представим себе, что газ из состояния изображенного точкой A , т. е. при температуре нагревателя T_1 , расширяется адиабатически до состояния D (рис. 127). Так как газ совершает работу за счет своей внутренней энергии, его температура понизится до температуры холодильной камеры T_2 . При этой температуре газ продолжает изотермически расширяться до состояния C .

Из § 59 мы уже знаем, что происходит в таком процессе: при малейшем расширении газа его температура чуть-чуть понизится — она станет ниже температуры холодильника. Следовательно, от холодильника к газу начнет поступать небольшое количество теплоты, пока их температуры не выровняются. И так будет продолжаться в течение всего изотермического процесса расширения газа, при котором он получит от холодильника количество теплоты Q_2 .

Далее начнем сжимать газ адиабатически до состояния, изображенного точкой B . За счет совершения внешними силами работы в этом процессе температура газа повысится до температуры нагревателя T_1 . Завершим цикл изотермическим сжатием газа до состо-

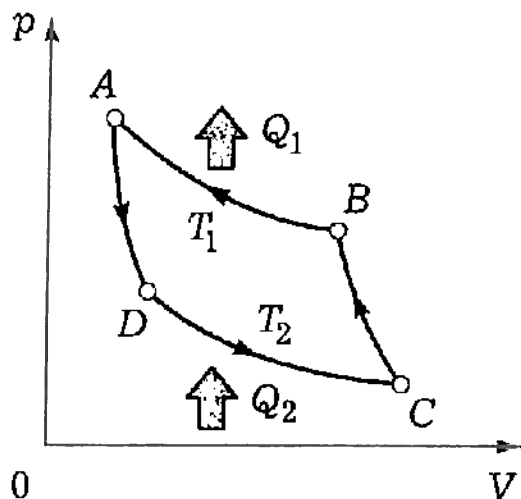


Рис. 127

яния А. В этом процессе температура газа при сжатии будет становиться чуть выше T_1 и тут же выравниваться за счет передачи теплоты от него нагревателю. Поэтому газ передает в этом процессе нагревателю количество теплоты Q_1 .

Что же произойдет в итоге такого «обратного» цикла работы тепловой машины?

От холодильной камеры с температурой T_2 газ (рабочее тело) получил некоторое количество теплоты Q_2 и передал более нагретому телу с температурой T_1 количество теплоты Q_1 .

Значит, в результате такого процесса температура холодного тела (холодильной камеры) понижается, а температура более горячего тела (например, окружающего воздуха) повышается.

Тепловая машина, в которой цикл расширения и сжатия газа совершается в направлении, обратном циклу в тепловом двигателе, представляет собой холодильную машину.

Однако возможен ли такой процесс? Не противоречит ли «обратный» цикл тепловой машины второму закону термодинамики? Ведь мы знаем, что теплопередача от менее нагретого тела к более нагретому самопроизвольно никогда не происходит. Это утверждение является одним из выражений второго закона термодинамики. Но рассмотренный выше процесс и не является самопроизвольным! Он происходит благодаря действию постороннего двигателя, осуществляющего сжатие рабочего тела (газа). Вспомним, что холодильные машины включают в электрическую цепь и электродвигатель осуществляет в нем сжатие газа за счет электрической энергии (компрессионные холодильники). Поэтому мы можем утверждать, что действие холодильной машины не противоречит второму закону термодинамики.

Холодильная машина как тепловой насос. Убедиться в том, что при работе холодильной машины не только охлаждается холодильная камера, но и нагревается окружающий воздух, можно, потрогав заднюю стенку домашнего холодильника. Нельзя ли поэтому использовать холодильную камеру 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 стать обогревателем. Но стоит ли это делать, не лучше ли пользоваться электроотопительными приборами, устройство которых необычайно просто?

Оказывается, использование холодильной машины в качестве обогревателя выгодно. Ведь при работе электрического нагревательного прибора передается окружающей среде только некоторое количество теплоты, равное работе электрического тока, т. е. потребляемой электрической энергии. При работе же холодильника выделяется количество теплоты, равное сумме работы компрессора и количества теплоты, отнятой («отсосанной») от холодильной камеры. Таким образом, окружающая среда получает **большее количество теплоты, чем было затрачено электроэнергии, и разница равна количеству теплоты, отобранной у более холодного тела.** Холодильную машину, работающую по такому принципу, называют тепловым насосом.

Тепловой насос может быть использован для обогрева помещения. Холодильную камеру для этого выставляют за окно, а нагревательный элемент, получающий энергию и передающий ее обогреваемому помещению, оставляют внутри этого помещения.

Разумеется, никакого нарушения первого закона термодинамики здесь нет — ведь дополнительное количество теплоты помещение получает за счет его «перекачки» от холодного наружного воздуха.

§ 67 Роль тепловых двигателей в развитии энергетики и транспорта

Жизнь современного общества немыслима без использования тепловых двигателей. Они необходимы для получения электроэнергии, для приведения в движение большинства транспортных машин.

Наибольшее значение имеет применение мощных паровых турбин на электростанциях для вращения роторов генераторов. Паровые турбины устанавливают также на атомных электростанциях, где для получения пара высокой температуры используется энергия атомных ядер.

На современном транспорте используются все виды тепловых двигателей. В автомобилях, тракторах, самоходных комбайнах, тепловозах применяются поршневые двигатели внутреннего сгорания. В авиации широко применяются газовые турбины. Реактивные двигатели, которые также относятся к тепловым, используются на космических ракетах.

Тепловые двигатели и охрана природы. При работе тепловых двигателей в атмосферу выбрасываются продукты сгорания топлива (оксиды углерода, сернистые соединения и др.), загрязняющие среду обитания человека, животных, растений. В связи с этим весьма важной стала проблема охраны природы.

С этой целью на электростанции устанавливаются очистные сооружения, препятствующие выбросу в атмосферу вредных веществ. Но на автомобилях, число которых быстро возрастает, создавать очистные сооружения очень сложно. Поэтому защита среды здесь должна осуществляться за счет более полного сгорания топлива, а также за счет его экономного расходования. Важно, например, ограничить скорость движения, так как при больших скоростях расход топлива резко возрастает. Перспективно также использование водорода в качестве горючего для тепловых двигателей: при сгорании водорода образуется вода, которая для окружающей среды, разумеется, безвредна.

Идут интенсивные исследования и по созданию электромобилей, способных заменить автомобили с бензиновым двигателем.

Самое важное в тринадцатой главе

Внутренняя энергия тела может изменяться при совершении работы и при теплопередаче. При теплопередаче внутренняя энергия горячего тела передается холодному без совершения работы. Чтобы изменение внутренней энергии горячего тела использовалось только для совершения работы, нужно исключить контакт этого тела с телом более низкой температуры. Для этого между горячим и холодным телами (нагревателем и холодильником) должно находиться рабочее тело (газ), которое расширяется и сжимается, не соприкасаясь с телами иной температуры. Это возможно в двух процессах — изотермическом и адиабатном.

Когда газ изотермически расширяется при температуре нагревателя, он получает от него некоторое количество теплоты Q и совершает работу A :

$$A = Q.$$

Внутренняя энергия самого газа при этом не изменяется. Работа совершается за счет внутренней энергии нагревателя.

При адиабатном расширении газа совершаемая работа равна уменьшению внутренней энергии самого газа:

$$A = -\Delta U.$$

Первый закон термодинамики состоит в следующем: количество теплоты Q , переданное телу, равно сумме изменения его внутренней энергии и совершенной работы:

$$Q = \Delta U + A.$$

Непрерывная работа теплового двигателя возможна только при циклическом процессе.

Механическую работу за счет внутренней энергии газа можно получить при его расширении. Работа сжатия газа совершается внешней силой. Чтобы эта работа была меньше работы расширения газа, сжатие должно происходить при более низких давлениях. Следовательно, перед сжатием газ должен быть охлажден. Поэтому в циклически действующей тепловой машине только часть энергии, полученной от нагревателя, может быть преобразована в механическую работу. Другая часть должна быть передана холодильнику. Коэффициент полезного действия тепловой машины всегда меньше единицы.

Если от нагревателя получено за цикл количество теплоты Q_1 , а холодильнику отдано количество теплоты Q_2 , то КПД машины равен:

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

Второй закон термодинамики утверждает следующее: в циклически действующей тепловой машине невозможно преобразовать в механическую работу всю энергию, полученную от нагревателя.

Идеальный тепловой двигатель — это такой, в котором расширение и сжатие газа происходят в адиабатных и изотермических условиях, а также в котором отсутствуют какие-либо потери энергии, кроме количества теплоты Q_2 , передаваемой холодильнику. КПД любого теплового двигателя не может быть больше КПД идеального двигателя, определяемого по формуле

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1},$$

где T_1 — температура нагревателя, T_2 — температура холодильника.

Тепловая машина, в которой цикл расширения и сжатия газа совершается в направлении, обратном циклу в тепловом двигателе, представляет собой холодильную машину.

ОСНОВЫ

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

Введение

Все физические явления связаны с теми или иными *взаимодействиями*, которые проявляются в виде сил. В курсе физики IX класса мы познакомились с *гравитационным* взаимодействием, которое проявляется, в частности, в виде силы тяжести. Гравитационное взаимодействие (притяжение) — это взаимодействие тел, обладающих массой (массивных тел). Масса — величина, характеризующая не только инертность тел, но и свойство тел притягиваться друг к другу.

В предыдущих главах мы познакомились с силами взаимодействия молекул — силами притяжения и отталкивания. Хотя молекулы тоже взаимодействуют силами всемирного тяготения, но эти силы не играют какой-либо роли, так как массы молекул очень малы. Взаимодействие молекул — это совсем другой вид взаимодействия — взаимодействие *электромагнитное*. Заметим здесь, что силы упругости и силы трения, о которых говорилось в механике, — это тоже проявление электромагнитного взаимодействия. Раздел физики, в котором изучаются электромагнитные взаимодействия, называется *электродинамикой*.

Если гравитационное взаимодействие — это взаимодействие между телами, обладающими массой, то электромагнитное взаимодействие — это взаимодействие тел, обладающих *электрическим зарядом*, т. е. электрически заряженных. Для краткости мы будем говорить просто о взаимодействии электрических зарядов. Электромагнитное взаимодействие — это взаимодействие электрических зарядов.

Первое электрическое явление, замеченное человеком еще в V в. до н. э., состояло в том, что потертый мехом или шерстью кусок янтаря притягивает к себе легкие тела — пылинки, обрывки ниток, волосы и т. д. Янтарь по-гречески — электрон. Отсюда и слова *электричество*, *электрический* и т. д. В XVII в. о потертом янтаре (или другом теле), притягивающем после натирания легкие тела, стали говорить, что он электрически *заряжен*, заряжен электричеством. Отсюда и слово *заряд*. О телах, не обладающих электрическим зарядом, говорят, что они электрически *нейтральны*. Понятие «электрический заряд» в некоторой мере сходно с понятием «масса». Электрический заряд — это свойство тел или частиц, из-за которого они действуют друг на друга электрической силой. Те же слова: *электрический заряд* (или просто *заряд*) — обозначают и величину, которая характеризует это свойство. Обозначают эту величину буквой q .

Масса и заряд: сходство и различие

Масса и электрический заряд — понятия сходные. Массивные тела взаимодействуют друг с другом силой всемирного тяготения, электрически заряженные тела — электрической силой. В этой главе мы увидим, как удивительно сходны эти взаимодействия. Но бросается в глаза и существенное различие между массой и зарядом.

Массой обладает любое тело, любая молекула, любой атом. Лишиться массы ни тело, ни молекула, ни атом не может.

Любое тело может иметь и электрический заряд. Но оно может и не обладать им. Если, например, тело заряжено, то оно может и лишиться своего заряда, снова его приобрести и вновь потерять. То же относится и к молекулам, и к атомам.

В этой главе мы выясним причину такого различия, для чего воспользуемся хорошо известным явлением электрического тока.

§ 68

Электрический ток и электрические заряды

Электрический ток — это упорядоченное движение носителей электрических зарядов. Чаще всего мы встречаемся с током в металлических проводниках. Но ток возможен и в неметаллах, например в растворах солей.

Количественно электрический ток характеризуется величиной, называемой силой тока. Напомним, что *сила тока* — это величина, равная отношению абсолютного значения заряда, протекающего через поперечное сечение проводника, к промежутку времени, за который этот заряд протекает. Если за время t через сечение проводника протекает заряд q , то сила тока равна $I = \frac{q}{t}$.

Сила тока настолько важная величина, что она входит в число тех физических величин, которые служат основой международной системы единиц (СИ). Единица силы тока называется ампер (сокращенно: А). Наряду с единицами килограмм, метр, секунда, моль и кельвин ампер входит в число основных единиц СИ, через которые выражаются все другие единицы.

Единица заряда. Электрический заряд связан с силой тока выражением

$$q = It.$$

Из него легко получить единицу заряда. За единицу электрического заряда принимается заряд, проходящий через поперечное сечение проводника за 1 с при силе тока в проводнике 1 А. Называется эта единица кулон (сокращенно: Кл):

$$1 \text{ Кл} = 1 \text{ А} \cdot \text{с}.$$

Два вида электрических зарядов. Интересно, что в целом проводник, по которому течет электрический ток, **электрически нейтрален**, хотя по нему протекает электрический заряд. **Объясняется** это тем, что существуют два вида зарядов. Еще в XVIII в. их совершенно условно называли *положительным* и *отрицательным* зарядами. В нормальных условиях во вся-

ком теле, а значит, в каждом атоме, в каждой молекуле оба вида зарядов содержатся в строго одинаковых количествах. Носителями отрицательного заряда являются частицы *электроны*, положительного — *протоны*. И те и другие входят в состав каждого атома, каждой молекулы. Заряды электрона и протона в точности равны друг другу и отличаются только знаком. В каждом атоме число электронов равно числу протонов. Поэтому атом, молекула и всякое тело, из них состоящее, электрически нейтральны. Но атомы устроены так, что от них сравнительно легко оторвать один или даже несколько электронов (именно электронов, а не протонов). Тогда атом, потерявший электроны, становится *положительно заряженным ионом*. К атому может и добавиться электрон или несколько электронов. Такой атом с «лишними» электронами — это *отрицательно заряженный ион*. Электрический ток и есть направленное движение электронов или ионов (иногда и тех и других одновременно).

Таким образом, благодаря существованию двух видов зарядов и атом, и молекула, и тело, состоящее из них, могут быть и заряженными, и нейтральными. Но не могут лишиться своего заряда электроны и протоны. Для них заряд — такое же присущее им свойство, как и масса. Электрические явления потому и наблюдаются в природе, что существуют заряженные частицы (электроны и протоны), входящие в состав атомов любого вещества.

Каков заряд заряженных частиц? Ответ на этот вопрос можно получить из опыта, рассмотрев прохождение электрического тока через раствор какой-нибудь соли, например медного купороса CuSO_4 .

В сосуд с раствором CuSO_4 поместим две графитовые пластинки, предварительно определив их массу на точных весах. Присоединим пластинки к источнику постоянного тока, например к аккумулятору, включим в цепь амперметр для измерения силы тока, реостат и выключатель (рис. 128). Мы образовали электрическую цепь, которую выключателем можно замкнуть и разомкнуть.

Замкнем цепь и с помощью реостата будем поддерживать силу тока постоянной, равной, например, 2 А. Отметим по часам момент замыкания цепи.

Результат прохождения тока в цепи можно будет скоро увидеть — на пластинке, присоединенной к отрицательному полюсу источника, появится слой меди. Через определенное время, например через 15 мин, выключим ток и найдем массу той пластинки, на которой появилась медь. Весы покажут, что на пластинке оказалось 0,592 г меди.

Что же произошло в цепи, точнее, в той ее части, которую составляют раствор медного купороса и погруженные в него пластинки? Почему на пластинке появилась медь? Очевидно, она была принесена электрическим током. Значит, в токе на этом участке цепи участвовали

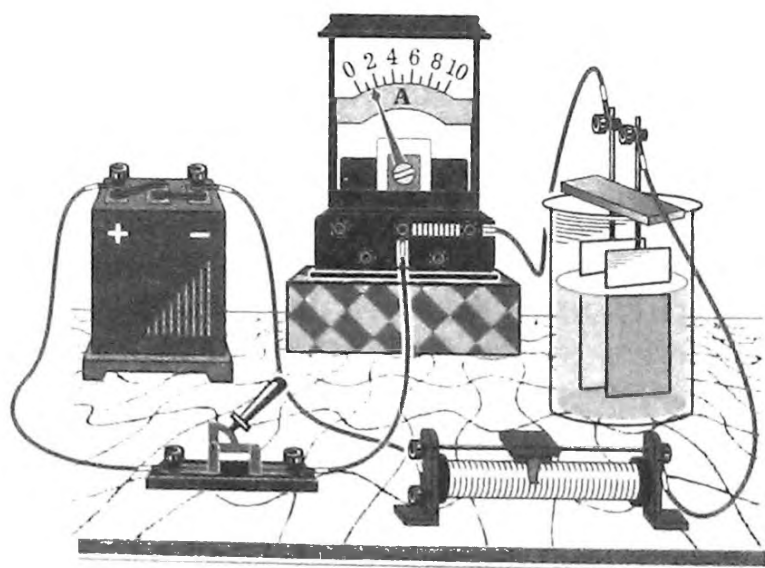


Рис. 128

атомы меди. Но, конечно, не нейтральные атомы меди, а положительно заряженные ионы. Их-то заряд мы и вычислим.

Известно, что число частиц в теле массой m равно:

$$N = \frac{m}{M} N_A,$$

где M — молярная масса вещества (в данном случае меди) и N_A — постоянная Авогадро. Пользуясь таблицей Менделеева, можно узнать, что относительная молекулярная масса M_r меди равна 63,54 (здесь не следует округлять M_r до целого числа!). Значит, молярная масса меди равна $6,354 \cdot 10^{-2}$ кг/моль. Следовательно, число атомов меди, появившихся на пластинке, равно:

$$N = \frac{5,92 \cdot 10^{-4} \text{ кг}}{6,354 \cdot 10^{-2} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{моль}} = 5,61 \cdot 10^{21}.$$

Вот эти $5,61 \cdot 10^{21}$ ионов меди и принесли тот заряд, который прошел за 15 мин через раствор при силе тока 2 А. А заряд этот равен:

$$q = It = 2 \text{ А} \cdot 900 \text{ с} = 1800 \text{ Кл}.$$

На каждый ион, таким образом, приходится заряд, равный

$$q_0 = \frac{1800 \text{ Кл}}{5,61 \cdot 10^{21}} = 3,2 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}.$$

Таков заряд иона меди.

Самый маленький заряд в природе. Опыты, подобные описанному, можно провести с другими растворами. Они показали бы, что заряды ионов разных веществ различны. У ионов натрия, например, заряд равен $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, алюминия — $4,8 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Замечательно, что ни в одном случае не наблюдается ион с зарядом, меньшим чем $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. И во всех случаях заряд иона в целое число раз больше чем $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Но ион — это атом, от которого оторван один или несколько электронов. Значит, заряд электрона как раз и равен $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Так что ион натрия — это атом натрия, лишившийся одного электрона, ион меди — это атом меди, потерявший 2 электрона, и т. д.

Не только в опытах с прохождением тока через растворы солей, но и во множестве других опытов никогда не обнаруживался заряд, меньший чем $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, или заряд, который не был бы кратен этому значению. Заряд, равный по модулю заряду электрона, — это наименьший заряд, который встречается в природе. Его называют элементарным зарядом и обозначают буквой e : $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Существование элементарного заряда — одно из замечательных явлений природы.

■ ВОПРОСЫ

1. Какой электрический заряд принимается за единицу заряда?
2. Почему тела могут быть электрически нейтральными, хотя в атомах, из которых они состоят, имеются электрически заряженные частицы?
3. Чем замечателен заряд, значение которого равно $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл?
4. Может ли существовать частица с зарядом $1,2 \cdot 10^{-19}$ Кл?
5. Как можно экспериментально определить заряд электрона?

Взаимодействие зарядов, заряженных тел мы начнем изучать со случаев покоящихся (относительно выбранной системы отсчета) тел. Часть электродинамики, в которой изучаются взаимодействия покоящихся зарядов, называется *электростатикой*.

Как электрически зарядить тело? Окружающие нас тела обычно электрически нейтральны. Чтобы зарядить тело, или, как говорят, наэлектризовать его, от него нужно оторвать и удалить какое-то число электронов (только их и можно отрывать). Тело тогда становится положительно заряженным. Наоборот, если к нейтральному телу добавить электроны, оно станет отрицательно заряженным. Об одном способе электризации мы уже упоминали. Это электризация трением. Такая электризация происходит при *контакте* двух *разных* тел. Но так как для надежности контакта тела потирают одно о другое, то и говорят об электризации трением. При контакте электроны переходят от тела, в котором они слабее связаны в атоме, к телу, в котором связь сильнее. Так, например, стекло при натирании его мехом становится отрицательно заряженным. Оно приобрело электроны, оторвавшиеся от меха. Мех, конечно, тоже стал заряженным, но заряженным положительно. То же стекло после натирания шелком получает положительный заряд: соседство с шелком заставило какое-то число электронов покинуть стекло и перейти на шелк.

Существуют и другие способы электризации. Многие металлы, например, можно наэлектризовать, освещая их подходящим источником света, потому что свет может вырывать электроны из металла. Любое тело электризуется, когда на него попадают заряженные частицы, испускаемые радиоактивными веществами. Радиоактивный препарат при этом тоже становится заряженным, но зарядом противоположного знака.

Еще один закон сохранения. Рассмотренные способы электризации тел показывают, что во всех случаях электрические заряды у тел не создаются, а происходит разделение уже существующих зарядов. Так, при электризации трением электроны переносятся с одного тела на другое и то, что одно из них теряет, другое получает. Одно из тел становится носителем положительного заряда, другое — носителем такого же по абсолютному значению отрицательного заряда. Сумма же (алгебраическая) обоих зарядов остается такой, какой она была до электризации, т. е. равной нулю. Ведь до электризации тела не были заряжены! То же происходит и при других способах электризации.

Ни положительный, ни отрицательный заряд отдельно не возникает¹. Поэтому если имеется совокупность тел, заряженных и незаряженных, электрически изолированная от других тел (такая система тел называется *замкнутой системой*), то ее общий электрический заряд остается неизменным. В этом состоит один из важнейших законов природы — *закон сохранения электрического заряда*. Формулируется он следующим образом:

¹ В природе известны явления, в которых заряженные частицы могут возникать (рождаться) и исчезать. Но, оказывается, частицы и рождаются, и исчезают парами, состоящими из частиц с противоположными знаками заряда. Один из участников такой пары называется частицей, другой — античастицей.

Алгебраическая сумма электрических зарядов замкнутой системы тел остается неизменной при любых процессах в этой системе.

Этот закон не менее важен, чем другие законы сохранения, с которыми мы познакомились в курсе физики IX класса.

Как взаимодействуют заряженные тела? Как бы ни было наэлектризовано тело, его электризация обнаруживается по его взаимодействию с другими заряженными телами. Взаимодействие это состоит в том, что заряженное тело притягивает к себе тела, несущие на себе заряд противоположного знака, и отталкивает от себя тела с одноименным знаком заряда. Так, два пластмассовых стержня, натертые куском меха, взаимно отталкиваются друг от друга. Но пластмассовый стержень, натертый мехом, и стеклянный, натертый шелком, притягиваются один к другому. Силы притяжения и отталкивания, с которыми мы встречались в разделе «Молекулярная физика», — это и есть электрические силы, действующие между молекулами, точнее, между заряженными частицами, входящими в состав молекул.

■ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается процесс электризации тел? Сколько заряженных тел появляется при натирании одного тела другим? 2. При натирании стержня из плексигласа куском меха стержень становится отрицательно заряженным, потому что на нем появились «лишние» электроны. Откуда они взялись? 3. В чем состоит закон сохранения электрического заряда? При каких условиях он справедлив? 4. Как взаимодействуют между собой электрически заряженные тела?

§ 70 Перенос заряда. Проводники и диэлектрики

Проводники. Если какое-нибудь тело заряжено, то часть его заряда (иногда и весь заряд целиком) можно передать другому, незаряженному. Тогда и это другое тело станет заряженным. Это можно сделать, просто прикоснувшись заряженным телом к незаряженному. Но можно обойтись и без прикосновения.

Перенести заряд с одного тела на другое можно, соединив их куском из металла (например, тонкой проволокой). Из курса физики VIII класса известно, что металлы обладают способностью переносить заряды (проводить электричество).

Эта способность объясняется тем, что в металлах существуют электроны, которые без натирания или другого внешнего воздействия уже оторвались от своих атомов и могут свободно перемещаться по металлу. Их так и называют — свободные электроны. Их «свобода» ограничена только тем, что они не могут покинуть металлическое тело, в котором находятся. Свободные электроны образуют как бы электронный газ, для которого кусок металла служит сосудом, а его поверхность — стенками сосуда.

Те вещества, которые, подобно металлам, содержат в себе свободные заряженные частицы (необязательно электроны!), называются *проводниками*. Кроме металлов, к проводникам относятся растворы солей (вспомним опыт с медным купоросом), кислот и щелочей. В некоторой мере к проводникам можно отнести многие виды древесины, влажный воздух, ткани живых организмов, не исключая человека. Проводником является и земля.

Диэлектрики. Существуют и такие вещества, в которых свободных заряженных частиц нет. Электроны в них связаны с ядром, и атомы поэтому

нейтральны. Такие вещества называются *диэлектриками* или *изоляторами*. С их помощью нельзя переносить заряд с одного тела на другое. Их, наоборот, используют для предотвращения таких переносов и электрической изоляции.

К диэлектрикам относятся пластмассы, смолистые вещества, стекло, резина, газы, лишенные влаги, многие минералы (например, слюда) и др.

Электроскоп. На свойствах проводника проводить заряды основано действие *электроскопа* — прибора, служащего для обнаружения зарядов.

Напомним (см. учебник физики для VIII класса), что электроскоп представляет собой металлический кожух с введенным в него через изолятор металлическим стержнем, к верхнему концу которого прикреплен металлический шарик, а к нижнему — подвижная стрелка. Если прикоснуться к шарiku заряженным телом, то заряд распространится по всему стержню и стрелке. Сила отталкивания между стержнем и стрелкой заставит ее отклониться на некоторый угол по отношению к стержню, зависящий от заряда. В кожухе может быть устроена шкала для измерения угла. Тогда электроскоп становится *электрометром*.

Электроскоп — это не только школьный прибор. Миниатюрные и очень чувствительные электроскопы (со шкалой) широко используются для измерения дозы радиоактивных излучений.

■ ВОПРОСЫ

1. В чем состоит различие между проводником и диэлектриком? 2. Отрицательно заряженный проводник соединен металлической проволокой с землей. Что при этом происходит? 3. Положительно заряженный проводник соединен металлической проволокой с землей. Что при этом происходит?

§ 71

Закон электростатического взаимодействия (закон Кулона)

Электрически заряженные тела, заряженные частицы действуют друг на друга силами притяжения и отталкивания. Но как велики эти силы? От чего они зависят? Ответы на эти вопросы дает опыт.

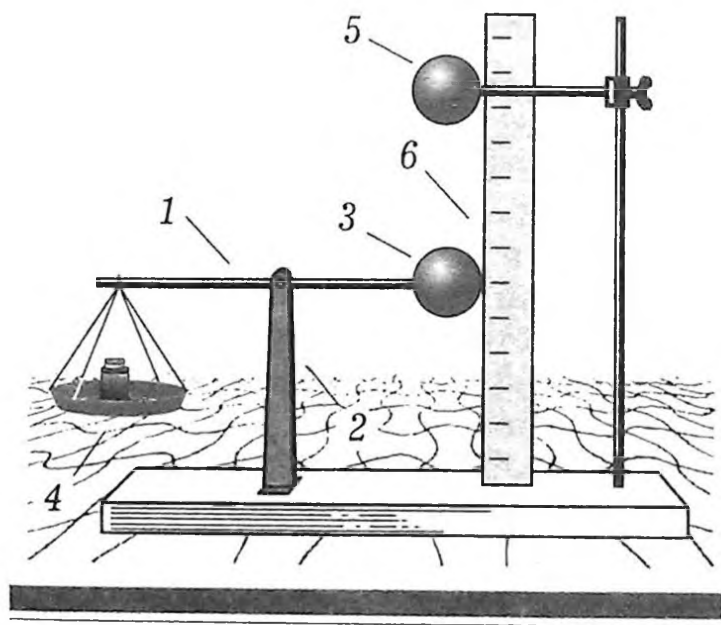


Рис. 129

Мы рассмотрим здесь случай, когда взаимодействующие заряженные тела находятся в пустоте, а не в какой-то вещественной среде, которая сама может повлиять на изучаемое взаимодействие. Впрочем, такая среда, как воздух атмосферы, практически никакого влияния на взаимодействие не оказывает.

Для измерения силы взаимодействия между заряженными телами можно воспользоваться какими-нибудь весами, например такими, какие схематически показаны на рисунке 129.

Весы представляют собой изолирующий стержень 1, укреплен-

ный на шарнире на стойке 2. К одному концу стержня прикреплен металлический шарик 3, а к другому подвешена чашка 4, на которую помещают гири, чтобы уравновесить шарик. Передвигая держатель с другим шариком 5 вдоль штатива, можно изменять расстояние между шариками 3 и 5 (оно отсчитывается по шкале 6).

Шарики 3 и 5 нужно зарядить так, чтобы их заряды были по возможности точно известны. Для этого можно, например, воспользоваться следующим способом.

Существуют вещества, называемые радиоактивными, самопроизвольно испускающие быстро движущиеся заряженные частицы. Среди них есть такие, которые испускают электроны. Имеются и такие вещества, из которых вылетают положительно заряженные частицы с зарядом вдвое больше заряда электрона (их называют альфа-частицами). Для всех таких радиоактивных веществ хорошо известно число частиц, испускаемых в единицу времени. Если небольшой препарат радиоактивного вещества известной массы на определенное время поместить внутрь полого металлического шарика, то будет точно известно число частиц, попавших на внутреннюю поверхность шарика, а значит, и сообщенный шарiku заряд.

Закон Кулона. Зарядив шарики, их устанавливают на определенном расстоянии друг от друга. Из-за силы отталкивания (если заряды обоих шариков одного знака) равновесие шарика 3 нарушится, и чтобы его восстановить, на чашку весов 4 нужно положить дополнительные гири. Их вес равен силе взаимодействия между заряженными шариками. Изменяя расстояние между шариками, можно выяснить, как сила взаимодействия зависит от расстояния. А сохраняя расстояние неизменным, но изменяя заряды шариков, можно найти зависимость силы взаимодействия от значения зарядов.

Опыты показали, что при прочих равных условиях силы взаимодействия между заряженными телами существенно зависят от формы и размеров этих тел. Но когда размеры тел малы по сравнению с расстоянием между ними, так что их можно считать точками (точечные заряды), то силы взаимодействия между ними подчиняются следующему закону:

Сила, с которой один точечный заряд действует на другой, направлена вдоль соединяющей их прямой; модуль этой силы пропорционален произведению абсолютных значений зарядов и обратно пропорционален квадрату расстояния между ними.

К этому нужно добавить, что сила взаимодействия зарядов одного знака — это сила отталкивания (рис. 130, а). Если же заряды имеют противоположные знаки, то это сила притяжения (рис. 130, б).

Математически полученный закон выражается формулой

$$F = k \frac{|q_1| |q_2|}{r^2}, \quad (1)$$

где $|q_1|$ и $|q_2|$ — абсолютные значения зарядов, r — расстояние между ними, k — постоянный коэффициент (коэффициент про-

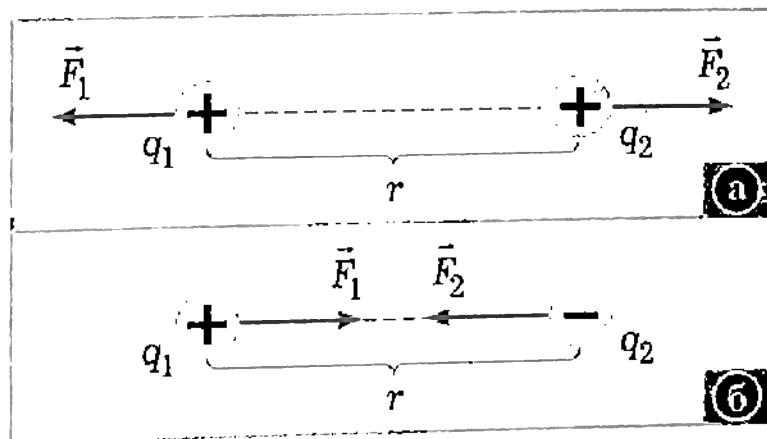


Рис. 130



Кулон
Шарль Огюстен
(1736—1806)

порциональности). По причинам, связанным с историей введения системы единиц, коэффициент k в формуле (1) записывается в виде $\frac{1}{4\pi\epsilon_0}$, и формула (1) принимает вид:

$$F = k \frac{|q_1||q_2|}{4\pi\epsilon_0 r^2}. \quad (2)$$

Здесь ϵ_0 — так называемая *электрическая постоянная*.

Закон взаимодействия зарядов, выражаемый формулами (1) или (2), был открыт в 1785 г. французским физиком Шарлем Кулоном и называется *законом Кулона*. В честь Кулона названа и единица электрического заряда.

Закон Кулона и закон Ньютона. Закон Кулона поразительно похож на закон всемирного тяготения Ньютона:

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

с которым мы познакомились в курсе физики IX класса. В обоих случаях сила взаимодействия обратно пропорциональна квадрату расстояния между телами (это самое главное!). В обоих случаях она пропорциональна величинам, характеризующим те свойства тел, из-за которых они взаимодействуют, — массам в одном случае и зарядам в другом.

Но есть и важное различие. Ньютоновская сила тяготения — это всегда сила притяжения. Кулоновская же сила взаимодействия зарядов может быть и силой притяжения (разноименные заряды), и силой отталкивания (знаки зарядов одинаковы).

Коэффициент k . Смысл коэффициента k в формуле закона Кулона ясен из самой формулы. Если бы взаимодействовали два точечных заряда в 1 Кл каждый, находясь на расстоянии 1 м, то на каждый из них действовала бы сила, численно равная k . А значение коэффициента k можно найти из опыта, описанного выше. Измерив заряды q_1 и q_2 , расстояние r между ними и силу F , можно вычислить k по формуле $k = \frac{Fr^2}{|q_1||q_2|}$. Опыты по-

казали, что $k = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{Кл}^2$. Это значит, что наши два заряда действовали бы один на другой с чудовищной силой $F = 9\,000\,000\,000 \text{ Н}$! С такой силой притягивается к Земле тело массой 900 000 т.

Отсюда видно, что электростатические силы очень большие силы. Надо, правда, заметить, что кулон очень крупная единица заряда. Не так-то просто сообщить телу заряд 1 Кл. На теле малых размеров такой заряд вообще не удержится: силы отталкивания между заряженными частицами приведут к тому, что часть частиц будет «выброшена» с поверхности тела. Чтобы, например, металлическому шару сообщить заряд 1 Кл, нужно, чтобы радиус шара был не меньше 10 м. Обычно приходится иметь дело с зарядами порядка микрокулонов (10^{-6} Кл).

Электрическая постоянная ϵ_0 . Присутствие электрической постоянной ϵ_0 в формуле закона Кулона, как уже указывалось, связано с некото-

рыми особенностями построения Международной системы единиц. Численное же ее значение можно найти из формулы $\varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi k}$. Следовательно,

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{12,56 \cdot 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}} = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}.$$

■ ВОПРОСЫ

1. Как формулируется закон Кулона? 2. В чем сходство и в чем различие между законами Кулона и Ньютона? 3. Каков смысл коэффициента k в формуле закона Кулона? 4. Во сколько раз изменится сила притяжения двух заряженных тел, если: а) заряд одного из них увеличить вдвое; б) вдвое увеличить расстояние между ними?

■ ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

1. На прямой, соединяющей положительный и отрицательный заряды q_1 и q_2 , каждый из которых по модулю равен $5 \cdot 10^{-7}$ Кл, расположен отрицательный заряд q_3 , равный по модулю $1 \cdot 10^{-8}$ Кл. Расстояние r_1 между зарядами q_1 и q_3 равно 6 см, а расстояние r_2 между зарядами q_2 и q_3 равно 3 см. Чему равна сила, действующая на заряд q_3 ? Как она направлена?

Решение. Заряд q_3 притягивается зарядом q_1 и отталкивается от заряда q_2 . Направим координатную ось X вдоль прямой, проходящей через заряды (рис. 131). Модули проекций сил $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ на ось X равны модулям самих сил, но знаки их проекций противоположны друг другу (проекция $\vec{F}_2$ положительна, а проекция $\vec{F}_1$ отрицательна). Проекция равнодействующей силы $\vec{F}$ равна алгебраической сумме проекций $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$. Модули сил $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ по закону Кулона равны соответственно

$$F_1 = k \frac{|q_1||q_3|}{r_1^2}, \quad F_2 = k \frac{|q_2||q_3|}{r_2^2}.$$

$$F = k \frac{|q_2||q_3|}{r_2^2} - k \frac{|q_1||q_3|}{r_1^2} = k|q_3||q| \left(\frac{1}{r_2^2} - \frac{1}{r_1^2} \right),$$

где $|q| = |q_1| = |q_2|$.

Подставив данные задачи, получим:

$$F = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2} \cdot 10^{-8} \text{ Кл} \cdot 5 \cdot 10^{-7} \text{ Кл} \cdot \frac{3}{36 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2} = 0,0375 \text{ Н}.$$

2. На двух нитях длиной по 30 см, закрепленных в одной точке, подвешены шарики массой по 20 г. Шарики заряжены одинаковыми по модулю одноименными зарядами, вследствие чего они оттолкнулись друг от друга на не-

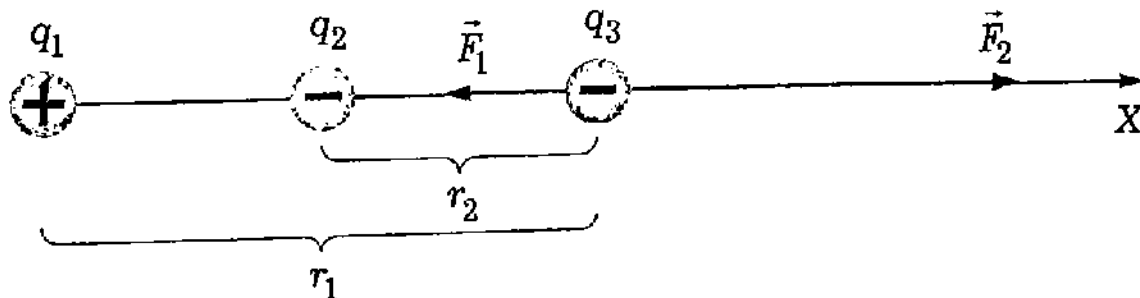


Рис. 131

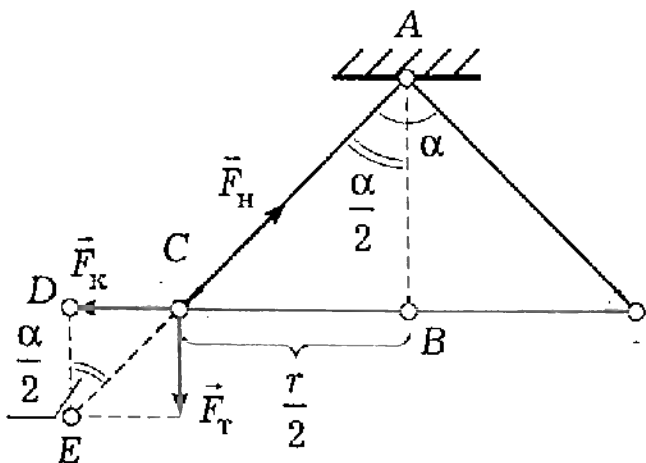


Рис. 132

которое расстояние. Нити при этом образовали угол 90° . Чему равен заряд, который был сообщен каждому из шариков?

Решение. На каждый шарик в состоянии равновесия действуют три силы: кулоновская сила $\vec{F}_k$, сила тяжести $\vec{F}_T$ и сила натяжения нити $\vec{F}_H$. Изобразим эти силы на рисунке (рис. 132).

Из подобия треугольников $\triangle ABC$ и $\triangle CDE$ можно найти кулоновскую силу, куда входит искомая величина заряда:

$$\frac{CD}{DE} = \frac{CB}{AB}, \text{ или } \frac{F_k}{F_T} = \operatorname{tg} \alpha/2, \text{ или } \frac{kq^2}{mgr^2} = \operatorname{tg} \alpha/2,$$

$$\text{откуда } q^2 = \frac{r^2 mg \operatorname{tg} \alpha/2}{k}, \text{ или } q = \sqrt{\frac{r^2 mg \operatorname{tg} \alpha/2}{k}}.$$

Расстояние между зарядами r можно выразить через длину нити l из $\triangle ABC$:

$$\frac{r/2}{l} = \sin \alpha/2, \text{ или } r = 2l \sin \alpha/2.$$

Подставим значение r в выражение для заряда:

$$q = \sqrt{\frac{4l^2 mg \sin \alpha/2 \operatorname{tg} \alpha/2}{k}}.$$

Используя для этого выражения данные из условия задачи, получим искомое значение заряда каждого из шариков:

$$q = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,3^2 \text{ м}^2 \cdot 20 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot 0,7 \cdot 1}{9 \cdot 10^9 \text{ Н} \frac{\text{м}^2}{\text{Кл}^2}}} = 2,37 \cdot 10^{-6} \text{ Кл}.$$

■ УПРАЖНЕНИЕ 27

1. Электрон — это заряженная частица с зарядом, равным по модулю $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Но электрон обладает еще и массой, которая равна $9 \cdot 10^{-31}$ кг. Сравните силу отталкивания двух электронов с силой их гравитационного притяжения (найдите отношение модулей этих сил).

2. Два одинаковых по модулю точечных заряда, находящиеся на расстоянии r один от другого, взаимодействуют силой $\vec{F}$. Один из зарядов заменен другим, вчетверо большим. Каким должно быть теперь расстояние между ними, чтобы сила взаимодействия осталась прежней?

3. Маленький металлический шарик с зарядом $1,6 \cdot 10^{-6}$ Кл приводится в соприкосновение с таким же незаряженным шариком. Затем шарики раздвигаются до расстояния 30 см. С какой силой шарики отталкиваются друг от друга?

4. В тексте параграфа указано, что коэффициент k в формуле закона Кулона выражается в единицах $\text{Н} \cdot \text{м}^2/\text{Кл}^2$. Выразите k через основные единицы СИ.

Самое важное в четырнадцатой главе

Электростатическое взаимодействие — это взаимодействие покоящихся заряженных тел или частиц.

Электрический заряд — это свойство тел или частиц, из-за которого они взаимодействуют электростатической силой.

Существуют два вида электрических зарядов — положительные и отрицательные. Носители отрицательных зарядов — это электроны, положительных — протоны. В нейтральных атомах, молекулах, телах их число одинаково.

В природе соблюдается закон сохранения заряда: алгебраическая сумма зарядов в замкнутой системе остается неизменной.

Заряды одинакового знака отталкиваются. Заряды противоположных знаков притягиваются. Сила взаимодействия зарядов в пустоте, если размеры заряженных тел малы по сравнению с расстоянием между ними, определяется законом Кулона:

$$F = k \frac{|q_1| |q_2|}{r^2} = k \frac{|q_1| |q_2|}{4\pi\epsilon_0 r^2},$$

где $|q_1|$ и $|q_2|$ — модули зарядов, r — расстояние между ними, k — коэффициент пропорциональности ($k = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{Кл}^2$), ϵ_0 — электрическая постоянная ($\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}^2/(\text{Н} \cdot \text{м}^2)$).

глава 15 Электрическое поле

Материя — это не только вещество

Второй раз встречаемся мы в курсе физики со случаем, когда одно тело оказывает влияние на другое, находящееся на некотором расстоянии от него, т. е. когда тело *действует там, где его нет*. В первый раз это было действие, которое называют всемирным тяготением. И вот теперь мы познакомились с похожим действием одного электрически заряженного тела на другое.

В обоих случаях возникают вопросы: как это происходит? Каким образом, например, Солнце действует на Землю, удаленную от него на огромное расстояние в 150 млн км? Каким образом заряд q_1 (рис. 133), находящийся в точке O , действует на заряд q_2 , расположенный в точке O' , т. е. совсем в другом месте? Ведь между зарядами, так же как между Солнцем и Землей, как будто бы нет ничего такого, что могло бы передавать это действие! Значит, заряд каким-то образом «узнает», что где-то в другом месте есть другой заряд, с которым он должен взаимодействовать. Но такое «узнавание» невозможно, оно означало бы какое-то необъяснимое чудо. Наука же стремится не оставлять ничего необъяснимого и необъясненного. Если один заряд влияет на другой, расположенный вдали

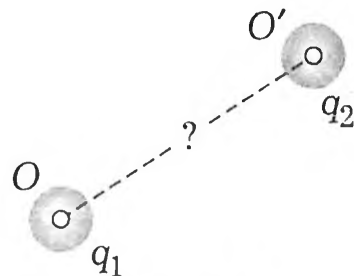


Рис. 133

от него, то должен быть какой-то передатчик такого влияния. Он действительно существует и называется *электрическим полем*. Точно так же передатчиком гравитационного взаимодействия служит *гравитационное поле*. В IX классе мы, правда, о таком поле не говорили, но не потому, что его нет, а потому, что те простые случаи взаимодействия тел, которые тогда рассматривались, можно было изучать, не пользуясь понятием поля. При изучении электромагнитного взаимодействия без понятия поля обойтись нельзя.

Таким образом, в природе, оказывается, существует не только вещество, т. е. атомы, молекулы и тела, которые из них состоят. Есть еще и другой вид материи — поле гравитационное, электрическое, магнитное, электромагнитное и др. В этой главе мы познакомимся с электрическим полем. Точнее, с полем, которое связано с *покоящимися* электрическими зарядами. Его называют электростатическим полем.

§ 72 Электростатическое поле

Обратимся еще раз к рисунку 133. На заряд q_2 в точке O' действует некоторая сила. Можно сказать, что с этой силой на него действует заряд q_1 . Но ведь он находится в другом месте — в точке O . Поэтому более естественно считать, что в самой точке O' есть «нечто», действующее на заряд q_2 . И если убрать заряд q_2 , то это «нечто» там останется. Если поместить заряд q_2 в любую другую точку пространства, окружающего заряд q_1 , то и там на него будет действовать сила. Значит, и там есть это «нечто».

Вот это «нечто» и есть электростатическое поле. Оно существует во всех точках пространства, окружающего электрический заряд, независимо от того, есть там другой заряд или нет, подобно тому как передаваемое радиостанцией сообщение не зависит от того, включен ли наш приемник. Включив приемник, мы услышим сообщение; поместив в поле заряд, мы узнаем, что поле существует, по той силе, с которой оно действует на этот заряд. В свою очередь, и заряд q_2 окружен электростатическим полем, которое обнаруживается с помощью заряда q_1 .

Электростатическое поле вокруг заряженного тела так же реально, как реально само заряженное тело. Реальность поля обнаруживается тем, что на всякий заряд в нем действует сила, которую можно измерить.

Электрическое поле — это особый вид материи, существующей вокруг любого электрического заряда. Реальность электростатического поля не означает, однако, что оно похоже на привычную нам материю — вещество. О поле нельзя сказать, что оно так-то устроено, состоит из таких-то частей и т. д. Тем не менее электростатическое поле обладает вполне определенными свойствами, которые могут быть изучены. Для описания свойств поля вводятся определенные величины, как это делается для описания свойств тел, любых материальных объектов. Одна из таких величин — *напряженность* электростатического поля.

Напряженность электростатического поля. Напряженность поля — это характеристика поля в каждой его точке. Пусть в некоторой точке M поля, окружающего точечный заряд q , находится другой, «пробный» заряд Q . На него действует сила $\vec{F}$, модуль которой согласно закону Кулона равен:

$$F = k \frac{|q||Q|}{r^2},$$

где r — расстояние точки M от точки, в которой находится заряд q (рис. 134).

Электростатическое поле заряда q существует независимо от того, какой заряд Q в него помещен и помещен ли он вообще. Поэтому сила $\vec{F}$, зависящая от Q , не может служить характеристикой поля в точке M . А вот величина $\frac{F}{|Q|} = k \frac{|q|}{r^2}$ от Q не зави-

сит (в выражение $k \frac{|q|}{r^2}$ не входит Q !) и может служить характеристикой поля. Ее и называют напряженностью поля. Обозначают напряженность буквой E . Это величина векторная, поскольку $\vec{F}$ — вектор:

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

Для электростатического поля точечного заряда модуль вектора $\vec{E}$ равен:

$$E = k \frac{|q|}{r^2}.$$

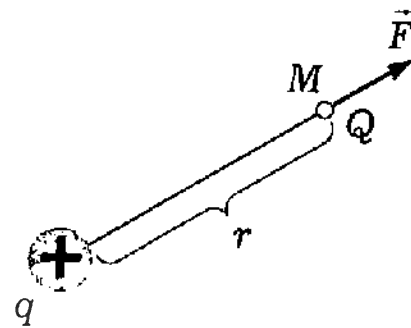


Рис. 134

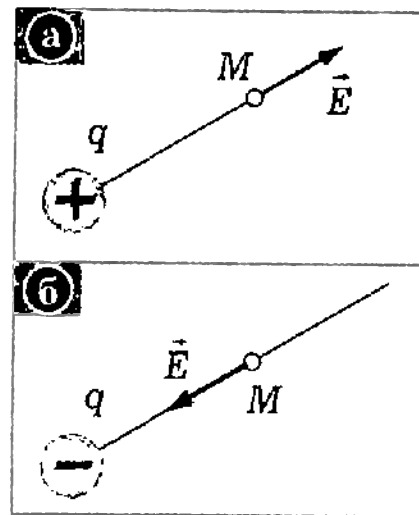


Рис. 135

Чтобы было определено и направление вектора $\vec{E}$, нужно условиться о знаке «пробного» заряда. Условились, что знак заряда положительный. Следовательно, *напряженностью электростатического поля* в какой-либо его точке называется величина, равная отношению силы, действующей на положительный заряд, помещенный в этой точке, к значению этого заряда.

Из выражения $E = \frac{F}{Q}$ можно определить единицу напряженности поля: за единицу напряженности принимается напряженность такой точки поля, в которой на заряд 1 Кл действует сила 1 Н.

В поле, созданном *положительным* зарядом, вектор напряженности $\vec{E}$ в какой-то точке M направлен от заряда вдоль прямой, соединяющей заряд с этой точкой (рис. 135, а). В поле, созданном *отрицательным* зарядом, вектор $\vec{E}$ направлен к заряду q (рис. 135, б).

Когда мы говорим, что напряженность поля в данной точке определяется силой, действующей на единичный заряд в этой точке, это вовсе не означает, что в нужную точку надо поместить непременно заряд, равный 1 Кл. «Пробным» может быть любой заряд, и это не мешает нам найти напряженность поля. Поместив, например, в интересующую нас точку заряд, равный $1 \cdot 10^{-10}$ Кл, и найдя, что на него действует сила $1 \cdot 10^{-4}$ Н, мы легко вычислим, что напряженность поля равна $\frac{10^{-4} \text{ Н}}{10^{-10} \text{ Кл}}$, т. е. 10^6 Н/Кл.

Теперь, когда введено понятие напряженности поля, мы можем уже не говорить о силе, с которой на заряд действует другой заряд. Можно говорить о силе, с которой на заряд действует поле в той точке, где он находится. Если в точке, где находится, например, заряд Q , напряженность поля равна $\vec{E}$, то сила $\vec{F}$, которая действует на заряд, равна:

$$\vec{F} = Q\vec{E}.$$

Эта формула не «отменяет» закон Кулона. Ведь для того чтобы узнать E , без закона Кулона не обойтись. Именно пользуясь законом Кулона, мы нашли, что напряженность поля точечного заряда q равна $k \frac{|q|}{r^2}$.

Поля (напряженности полей) складываются. Часто приходится иметь дело с электростатическими полями, созданными не одним зарядом, а многими. Ведь и о поле, созданном заряженным телом (а не точкой), можно сказать, что оно создано множеством его точек. Одно из свойств электростатического поля состоит в том, что если поле создано многими зарядами, то напряженность такого поля будет равна сумме напряженностей полей отдельных зарядов. В этом заключается *принцип суперпозиции полей*: напряженность электростатического поля системы зарядов равна векторной сумме напряженностей полей отдельных зарядов.

■ ВОПРОСЫ

1. Как обнаруживается присутствие электростатического поля? 2. Что такое напряженность электростатического поля? 3. Чему равна напряженность электростатического поля точечного заряда? 4. Как связана сила, действующая на заряд в электростатическом поле, с напряженностью поля в точке, где находится заряд? 5. В чем состоит принцип суперпозиции полей? 6. Гравитационное поле вокруг массивного тела тоже характеризуется напряженностью поля. Сравните выражение $\vec{F} = q\vec{E}$ с известным выражением $\vec{F} = m\vec{g}$. Чему равна напряженность гравитационного поля Земли вблизи ее поверхности?

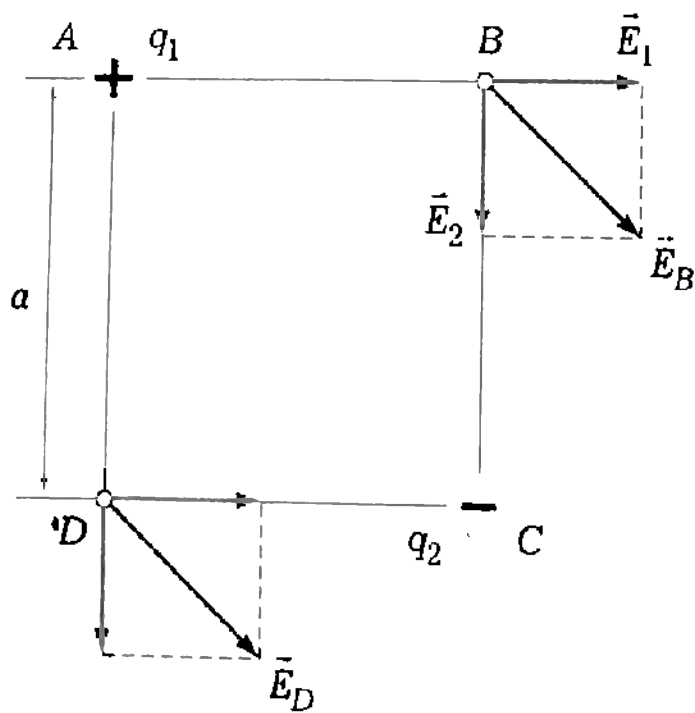


Рис. 136

■ ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

В двух вершинах A и C квадрата со стороной $a = 3$ м (рис. 136) расположены разноименные заряды q_1 и q_2 , модули которых одинаковы и равны $2 \cdot 10^{-6}$ Кл. Найдите напряженности поля в двух других вершинах квадрата.

Решение. Напряженность $\vec{E}_B$ в вершине B равна сумме напряженностей $\vec{E}_1$ и $\vec{E}_2$ полей, созданных зарядами q_1 и q_2 . По модулю эти напряженности равны друг другу и направлены так, как показано на рисунке 136. По формуле для напряженности поля точечного заряда находим:

$$E_1 = E_2 = k \frac{|q|}{a^2}, \text{ где } |q| = |q_1| = |q_2|.$$

По принципу суперпозиции, применив теорему Пифагора, получим результирующую напряженность E_B (ее модуль) в точке B :

$$E_B = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} = \sqrt{2k^2 \frac{q^2}{a^4}} = \sqrt{2} \frac{k|q|}{a^2}.$$

Подставляя значение $k = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{Кл}^2$ и данные, приведенные в условии задачи, найдем:

$$E_B = 1,4 \cdot 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2} \cdot \frac{2 \cdot 10^{-6} \text{ Кл}}{9 \text{ м}^2} \approx 3 \cdot 10^3 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}.$$

Таков, очевидно, и модуль напряженности $\vec{E}_D$ в вершине D . Направления векторов $\vec{E}_B$ и $\vec{E}_D$ ясны из рисунка.

■ УПРАЖНЕНИЕ 28

1. На отрицательный точечный заряд, находящийся в точке A , действует сила F , направленная так, как показано на рисунке 137. Модуль заряда равен $|q| = 4 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$, модуль силы $F = 3 \cdot 10^{-6} \text{ Н}$. Найдите напряженность поля в точке A . На каком расстоянии от точки A находится заряд Q , создавший поле, если известно, что это точечный заряд, равный 10^{-8} Кл ?

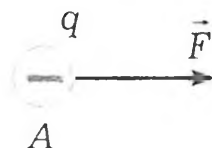


Рис. 137

2. Два разноименных точечных заряда, равные по модулю, находятся на расстоянии a друг от друга. Найдите напряженность поля в точке, делящей отрезок, соединяющий заряды, пополам, и в точках, расположенных на продолжении этого отрезка, на расстоянии $a/2$ от зарядов.

3. В вершинах квадрата расположены одинаковые по модулю положительные точечные заряды. Чему равна напряженность поля в центре квадрата?

4. Найдите напряженность электростатического поля, созданного протоном, в точке на расстоянии 10^{-10} м от него. Если в этой точке находится электрон, то чему равна сила, действующая на него?

5. Выразите единицу напряженности электростатического поля через основные единицы СИ.

§ 73 Силовые линии электростатического поля

Электростатическое поле, хотя оно и не похоже на обычные предметы, все же символически «изображают» так, что можно по «внешнему виду» отличать поля, созданные одними зарядами, от полей, созданных другими. Как это делают?

Для электростатического поля характерно прежде всего то, что в каждой его точке вектор напряженности имеет определенный модуль и определенное направление. Эти векторы и могли бы служить «картиной» поля. Так, на рисунке 138 с помощью векторов представлено поле некоторого положительного точечного заряда. Каждая стрелка на рисунке показывает направление напряженности поля в точке, откуда она исходит, а ее длина в выбранном масштабе дает нам численное значение напряженности. Если мы представим себе положительный точечный

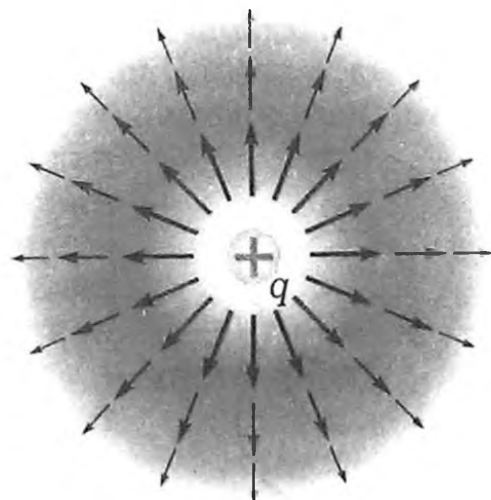


Рис. 138

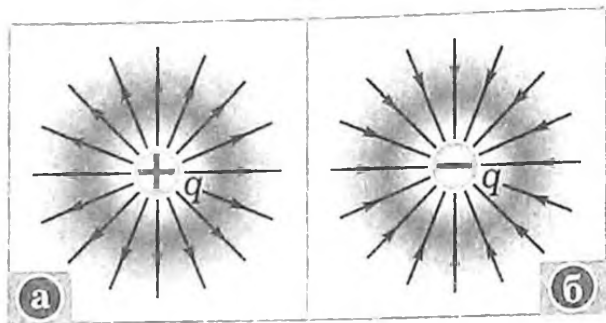


Рис. 139

разбираться. Поэтому условились вместо стрелок рисовать сплошные линии, направленные в *каждой точке* по вектору напряженности поля. Такие линии и показаны на рисунке 139, а. Называют их *силовыми линиями* или *линиями напряженности*. На рисунке 139, б показаны силовые линии поля отрицательного точечного заряда.

Если имеется точечный заряд и вблизи нет других зарядов, то мы должны считать, что силовые линии как бы выходят из положительного заряда и заканчиваются в бесконечности. А если заряд отрицательный, то силовые линии начинаются в бесконечности и заканчиваются на отрицательном заряде. В действительности таких «уединенных» зарядов нет. Ведь если какое-то тело стало положительно заряженным, то какое-то другое получило такой же отрицательный заряд. Поэтому общее правило такое: силовые линии электростатического поля начинаются на положительном заряде и заканчиваются на отрицательном. Силовые линии имеют начало и конец. Это — одно из основных свойств электростатического поля.

Два точечных заряда. В качестве примера электростатического поля рассмотрим поле двух равных по модулю, но противоположных по знаку зарядов (рис. 140). Такая система двух зарядов называется *электрическим диполем*.

Картину силовых линий поля диполя мы получим, если по принципу суперпозиции полей сложим (векторно!) в каждой точке напряженности полей, создаваемых каждым из зарядов в отдельности. Результат такого сложения и представлен на рисунке 140. Как и должно быть, силовые линии «вытекают» из положительного заряда и «втекают» в отрицательный. В отличие от поля одного точечного заряда силовые линии поля диполя не прямые линии, а искривленные. А напряженность поля в каждой точке направлена по касательной к силовой линии в этой точке. И вообще силовая линия — это линия, по касательной к которой в каждой точке поля направлен вектор напряженности поля. Так же направлена и сила, действующая на заряд в поле. Если заряд положительный, то направление силы совпадает с направлением вектора напряженности. Если заряд отрицательный, то сила направлена в сторону, противоположную направлению напряженности.

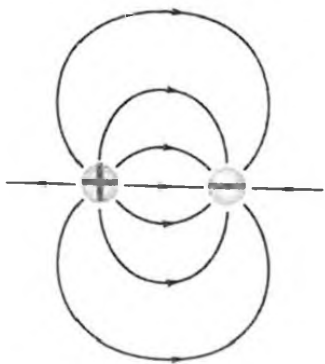


Рис. 140

Силовые линии и модуль напряженности поля. Мы только что видели, что картина силовых линий позволяет определить направление вектора напряженности в любой точке электростатического поля. Но с ее помощью можно судить и о модуле вектора $\vec{E}$.

заряд окруженным со всех сторон (а не только в плоскости) такими векторами-стрелками, то это и даст нам образ поля. Если заряд отрицательный, то образ будет такой же, но стрелки будут направлены к *заряду*.

Силовые линии. Но нельзя же рисовать векторы-стрелки во всех точках пространства, окружающего заряд. В такой «карте» поля было бы трудно

Рассмотрим поле точечного заряда. Графически оно изображается силовыми линиями, выходящими из заряда (если заряд положительный) или входящими в него (если заряд отрицательный), как это показано на рисунке 139. Число силовых линий может быть совершенно произвольным. Ведь поле существует во всех точках вокруг заряда, так что через любую точку можно провести силовую линию. Обозначим выбранное нами число силовых линий буквой N .

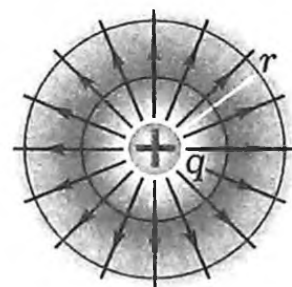


Рис. 141

Окружим мысленно заряд концентрическими сферами с центром в заряде (рис. 141). Из рисунка видно, что все N силовых линий пересекают все сферы; число силовых линий, пересекающих любую сферу, одно и то же.

С другой стороны, в любой точке любой сферы модуль напряженности выражается равенством

$$E = \frac{|q|}{4\pi\epsilon_0 r^2}, \quad (1)$$

где r — радиус какой-то сферы и одновременно расстояние от любой ее точки до заряда q , а $\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}^2/(\text{Н} \cdot \text{м}^2)$. Из формулы (1) следует, что

$$E \cdot 4\pi r^2 = \frac{|q|}{\epsilon_0}.$$

Но $4\pi r^2$ — это площадь сферы радиусом r . Обозначив ее буквой S , получим:

$$ES = \frac{|q|}{\epsilon_0}. \quad (2)$$

Произведение ES одинаково для всех сфер. Это и понятно, так как площадь сферы увеличивается как квадрат радиуса, а напряженность поля E в точках на сферах уменьшается как квадрат радиуса.

Мы видим, что для всех сфер одинаково число N силовых линий, пересекающих эти сферы, и одинакова величина ES . Поэтому при изображении электростатического поля при помощи силовых линий условились считать, что число силовых линий, выходящих из заряда или входящих в него, прямо пропорционально произведению ES :

$$N = ES, \quad (3)$$

или

$$N \sim \frac{|q|}{\epsilon_0}.$$

Значит, число силовых линий, выходящих из точечного заряда, пропорционально заряду тела.

В нашем простом случае точечного заряда S — это площадь сферы, *внутри* которой находится заряд. А такая сфера — это замкнутая поверхность, перпендикулярная силовым линиям поля, т. е. вектору напряженности.

ности поля. Для этого случая мы и получили, что $N \sim \frac{|q|}{\epsilon_0}$. Можно, однако, показать, что этот результат верен и для поля любой системы точечных зарядов, и для поля заряженного тела, которое тоже можно считать совокупностью точечных зарядов. Но если число силовых линий, выходящих из заряженного тела, зависит только от заряда, то ясно, что, какой бы замкнутой поверхностью (необязательно сферой) мы ни окружили это тело, силовые линии пересекут ее. Таким образом, если окружить любую систему зарядов замкнутой поверхностью, то число силовых линий N , пересекающих эту поверхность, прямо пропорционально отношению алгебраической суммы электрических зарядов $|q|$, находящихся внутри этой поверхности, к электрической постоянной ϵ_0 :

$$N = \frac{|q|}{\epsilon_0}. \quad (4)$$

Величина $\frac{N}{S}$ пропорциональна числу силовых линий, пересекающих поверхность единичной площади, перпендикулярную силовым линиям. Эту величину часто называют *густотой* силовых линий. Так как число силовых линий, графически изображающих поле, пропорционально величине ES , мы получаем возможность по картине силовых линий поля узнавать не только направление вектора напряженности, но и его модуль: модуль напряженности поля в любом его месте пропорционален густоте силовых линий в этом месте, т. е. числу силовых линий, пересекающих поверхность единичной площади, перпендикулярную силовым линиям.

Важно то, что $N \sim ES$, а

$$ES = \frac{|q|}{\epsilon_0}. \quad (5)$$

Это дает возможность во многих случаях вычислять напряженность электростатического поля.

Отметим в заключение, что величина ES называется *поток вектора напряженности* Φ электрического поля через поверхность, перпендикулярную направлению вектора $\vec{E}$. Из формулы (5) следует, что

$$\Phi = ES = \sum \frac{q}{\epsilon_0}. \quad (6)$$

Полученное выражение называется *теоремой Гаусса*:

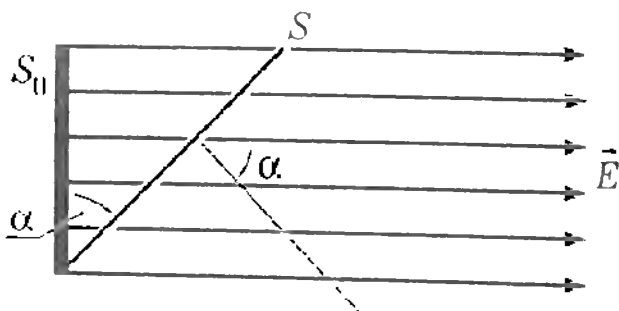


Рис. 142

поток вектора напряженности электрического поля через замкнутую поверхность равен отношению алгебраической суммы зарядов q , находящихся внутри этой поверхности, к электрической постоянной ϵ_0 .

Если поверхность не перпендикулярна вектору $\vec{E}$ (рис. 142), то в выражение для потока вместо E будет вхо-

доть $E \cos \alpha$, где α — угол между направлением вектора $\vec{E}$ и нормалью к поверхности, так что $\Phi = ES \cos \alpha$.

Эта формула является общей, так как из нее следует, что при $\alpha = 0$ (линии напряженности перпендикулярны поверхности) поток N максимален и равен ES ; при $\alpha = \frac{\pi}{2}$ (линии напряженности параллельны поверхности) поток равен нулю.

■ ВОПРОСЫ

1. Что такое силовая линия поля? 2. Что такое густота силовых линий? Как связана густота силовых линий поля с напряженностью поля? 3. На рисунке 143, а, б показаны картины силовых линий поля точечных зарядов q_1 и q_2 . Напряженность поля какого из них в точке А на расстоянии r от заряда больше? Какой из двух зарядов больше? 4. В чем состоит теорема Гаусса? 5. Что называется потоком вектора напряженности электрического поля?

■ ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Между вертикальными пластинами плоского конденсатора, находящегося в воздухе, подвешен на тонкой шелковой нити маленький шарик, несущий заряд $q_1 = 3 \cdot 10^{-9}$ Кл. Какой заряд надо сообщить пластинам конденсатора, чтобы нить с шариком отклонилась на угол $\alpha = 45^\circ$ от вертикали? Масса шарика $m = 0,04$ г, площадь пластин конденсатора $S = 300$ см². Массой нити можно пренебречь.

Решение. На шарик будут действовать электрическая сила $\vec{F}_э$, сила тяжести $\vec{F}_т$, а также сила натяжения нити $\vec{F}_н$ (рис. 144). Отношение $F_э$ и $F_т$ равно $\operatorname{tg} \alpha$:

$$\frac{F_э}{F_т} = \operatorname{tg} \alpha,$$

откуда $F_э = F_т \operatorname{tg} \alpha$.

Подставив в полученное равенство значение силы $F_э = Eq_1$ и $F_т = mg$, получим: $Eq_1 = mg \operatorname{tg} \alpha$.

В этом равенстве E — напряженность поля, созданного плоским конденсатором. Заменяя E его значением $E = \frac{q_2}{\epsilon_0 S}$, получим $\frac{q_2 q_1}{\epsilon_0 S} = mg \operatorname{tg} \alpha$, откуда

$$q_2 = \frac{mg \operatorname{tg} \alpha \epsilon_0 S}{q_1}.$$

Подставив в последнее равенство данные из условия задачи, получим:

$$q_2 = \frac{4 \cdot 10^{-5} \text{ кг} \cdot 10 \frac{\text{М}}{\text{с}^2} \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}^2 \text{ Н}^{-1} \text{ м}^{-2} \cdot 300 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2}{3 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}} \approx 3,5 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}.$$

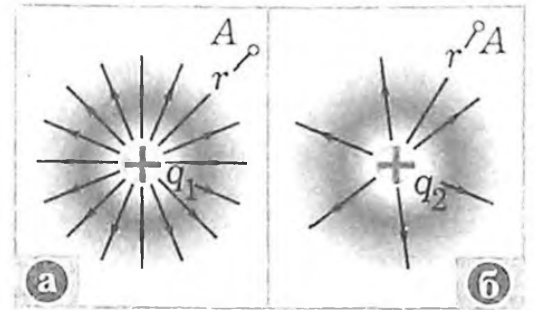


Рис. 143

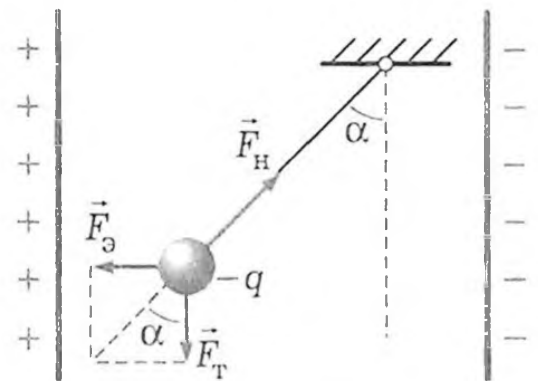


Рис. 144

■ ВЫРАЖЕНИЕ 29

1. На расстоянии 3 м от точечного заряда напряженность поля равна 40 Н/Кл. Сколько силовых линий выходит из заряда? Чему равен заряд?
2. Если при изображении картины силовых линий строго следовать формуле $\Phi = \frac{|q|}{\epsilon_0}$, то сколько силовых линий можно было бы провести при изображении поля точечного заряда $q = 10^{-6}$ Кл?

§ 74 Проводник в электростатическом поле

Возможна ли защита от электрического поля? Мы уже отмечали сходство гравитационного и электростатического взаимодействий: в обоих случаях сила обратно пропорциональна квадрату расстояния. Но есть и существенное отличие: сила гравитационная всегда сила притяжения, электрическая же сила может быть и силой отталкивания. Имеется еще одно отличие: от силы всемирного тяготения нельзя отгородиться. Не существует такого материала, из которого можно было бы, например, соорудить убежище от силы тяготения. А вот от электрической силы можно вполне надежно защититься. Материалом для такой защиты может служить любой проводник. Почему это возможно?

Электростатическое поле в заряженном проводнике. В незаряженном проводнике отрицательный заряд всех электронов точно сбалансирован положительным зарядом всех протонов. Но если проводник заряжен, баланс нарушается.

Допустим, что проводник, например кусок металла, заряжен *отрицательно*. Это значит, что в нем есть избыток электронов. Так как электроны могут свободно двигаться, то они, отталкиваясь друг от друга, разойдутся на максимально возможное расстояние, т. е. расположатся на поверхности проводника. Оставшиеся внутри электроны сбалансируют положительные заряды, и напряженность поля внутри металла будет равна нулю.

Если проводник заряжен положительно, то это значит, что в нем электронов меньше, чем нужно для баланса. Поэтому электроны с поверхности устремятся внутрь металла и сбалансируют положительный заряд. Внутри проводника напряженность поля и в этом случае равна нулю. Избыточный же положительный заряд сосредоточится на поверхности. Таким образом, заряд любого знака располагается на поверхности проводника. Внутри же поле отсутствует: $E = 0$.

Но если внутри проводника суммарный заряд равен нулю, то ничего не изменится, если внутреннюю часть проводника удалить, оставив лишь тонкую оболочку. В образовавшейся полости поля нет, хотя она и окружена заряженным проводником. Этим и пользуются для *электростатической защиты*, в которой часто нуждаются приборы и другие устройства. Простые опыты подтверждают сделанный вывод.

Зарядим изолированный полый металлический шар A с отверстием в верхней части. Небольшим пробным шариком B на изолирующей ручке коснемся наружной поверхности шара A (рис. 145, *а*). Прикоснувшись затем шариком B к электроскопу, убедимся, что шар A заряжен (рис. 145, *б*). Повторим этот опыт, но прикоснемся шариком B к внутренней поверхности шара A (рис. 146, *а*). Мы увидим, что шарик не приобрел

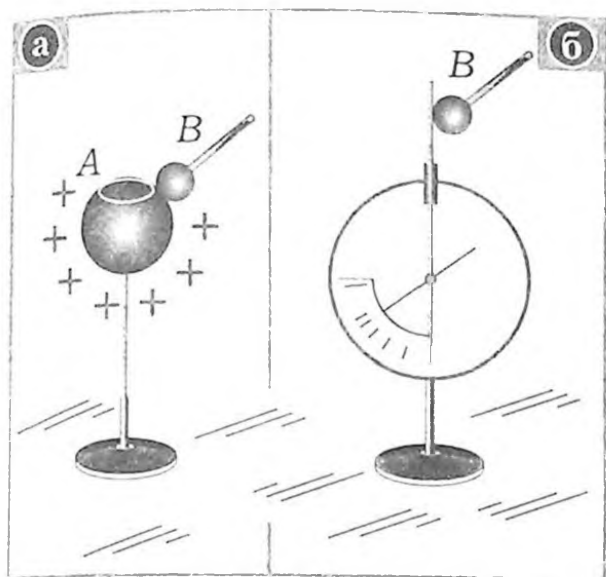


Рис. 145

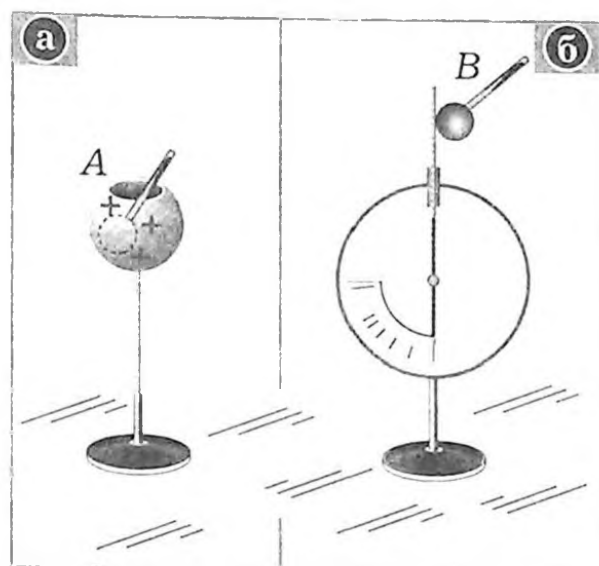


Рис. 146

заряда от шара A (рис. 146, б). Таким образом, весь заряд шара A расположен на его внешней поверхности.

Показателен и такой опыт. Зарядим пробный шарик и прикоснемся им к наружной поверхности шара A (рис. 147, а). Шар зарядится, но часть заряда останется и на шарике B (рис. 147, б). Если ввести заряженный шарик B внутрь шара A и коснуться его внутренней поверхности еще раз, то, вынув теперь шарик, мы убедимся, что заряда на нем нет: весь заряд шарика перешел на внешнюю поверхность шара A .

Силовые линии у поверхности проводника. Внутри заряженного проводника нет заряда, а значит, и поля. Но в пространстве, окружающем проводник, поле, конечно, есть. Силовые линии начинаются на проводнике, если он положительно заряжен, и заканчиваются на нем, если его заряд отрицательный.

Важная особенность проводника состоит в том, что в любой точке его поверхности силовые линии выходят из него или входят в него перпендикулярно его поверхности (рис. 148, а, б). Почему?

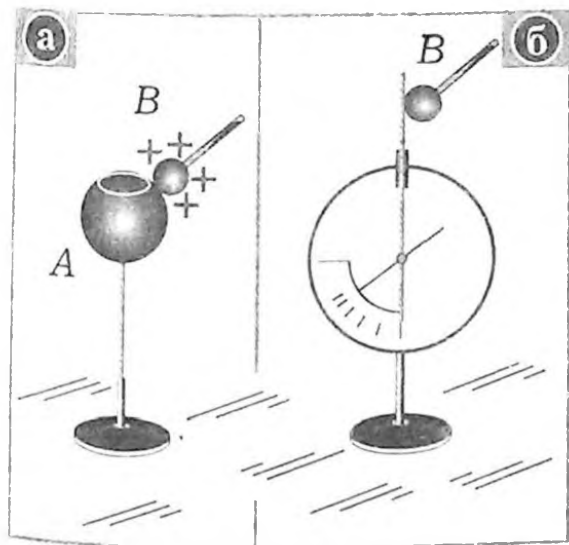


Рис. 147

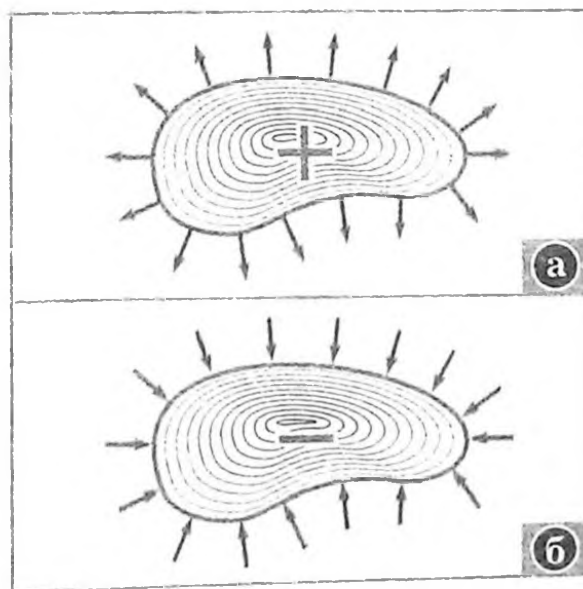


Рис. 148

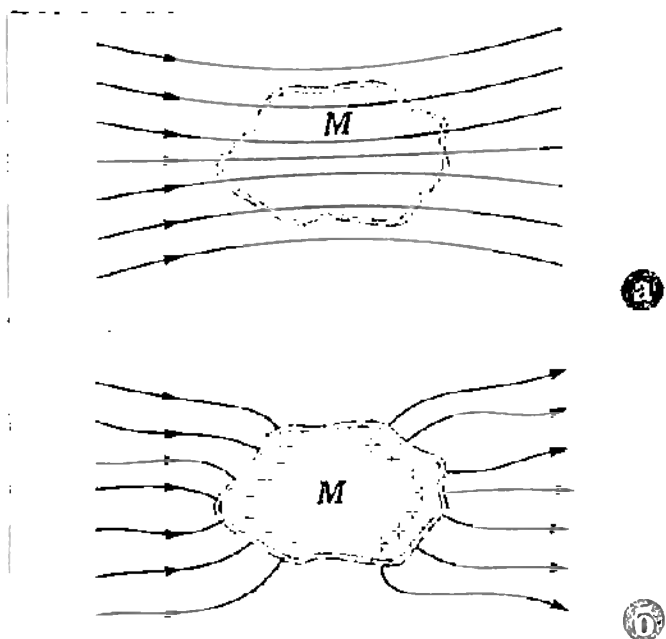


Рис. 149

Если проводник заряжен, например, отрицательно, то те «лишние» электроны, которые и делают его отрицательно заряженным, расположены на его поверхности. На любой из них действуют силы отталкивания со стороны его соседей на поверхности (внутри заряда нет!).

Но электроны свободны и могут перемещаться, если на них действует сила, направленная вдоль поверхности. Благодаря этой возможности перемещаться электроны расположатся так, чтобы сила, действующая на каждый из них со стороны соседей, была равна нулю. Но если сила, направленная вдоль поверхности, равна нулю, значит, силовые линии поля перпендикулярны поверхности проводника.

Это и показано на рисунке 148, а, б.

Незаряженный проводник в электростатическом поле. Теперь рассмотрим другой случай. Проводник *не заряжен*, но помещен в электростатическое поле. Как влияет это поле на проводник и как влияет проводник на поле?

Допустим, что проводник M помещен в поле с такой картиной силовых линий, какая показана на рисунке 149, а. Свободные электроны в проводнике немедленно устремятся в сторону, противоположную направлению силовых линий, т. е. к левой стороне проводника. В правой его стороне окажется избыток положительного заряда. Появившиеся на противоположных сторонах проводника отрицательные и положительные заряды создают свое поле, напряженность которого направлена противоположно напряженности внешнего поля. Поэтому электроны перемещаются в проводнике до тех пор, пока напряженности этих полей не сравняются по модулю. При этом результирующая напряженность поля в проводнике обратится в нуль, т. е. поле в проводнике исчезнет.

Внешнее поле при этом тоже изменится. Ведь теперь силовые линии внешнего поля должны заканчиваться на отрицательных зарядах левой части проводника M , а из положительных зарядов правой части силовые линии должны выходить. На рисунке 149, б показано, каким станет поле. Силовые линии внешнего поля как бы разорваны проводником. Входящие в проводник силовые линии и выходящие из него перпендикулярны его поверхности.

Еще один способ электризации. Разделение зарядов в проводнике, помещенном во внешнее поле, делает возможным еще один способ электризации проводника.

Допустим, что надо сообщить заряд изолированному проводнику A (наэлектризовать его). Приблизим к нему (не касаясь его) заряженное тело B . Проводник окажется в поле этого тела, и в нем произойдет разделение зарядов (рис. 150, а). Коснемся рукой дальнего от B края проводника. Заряд с него через руку, тело, пол и т. д. уйдет в землю. Но не уйдет заряд с дру-

гого конца. Уберем теперь руку и удалим заряженное тело B , и проводник окажется заряженным (рис. 150, б). Опыт можно многократно повторять, все время увеличивая заряд на проводнике. Такой способ электризации называется *электризацией через влияние*.

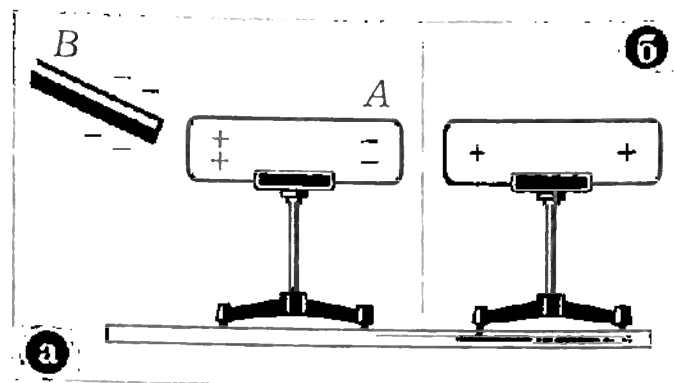


Рис. 150

■ ВОПРОСЫ

1. Что происходит в проводнике, помещенном в электростатическое поле? 2. Почему напряженность электростатического поля внутри проводника при равновесии зарядов равна нулю? 3. Как направлены силовые линии электростатического поля у поверхности проводника при равновесии зарядов? 4. Какое практическое значение имеет отсутствие электростатического поля внутри полого проводника? 5. Как размещается заряд на изолированном проводнике? 6. Каково электростатическое поле внутри заряженного проводника? 7. Можно ли отвести заряд с полого проводника в землю при помощи другого заземленного проводника, если этим заземленным проводником коснуться внутренней поверхности полого проводника?

§ 75

Напряженность поля неточечных зарядов.

Заряженная плоскость. Плоский конденсатор

В § 73 мы узнали, что для потока вектора напряженности электростатического поля через произвольную замкнутую поверхность, созданного зарядами, расположенными внутри этой поверхности, справедливо уравнение (теорема Гаусса)

$$\Phi = ES = \frac{\sum q}{\epsilon_0}. \quad (1)$$

Пользуясь теоремой Гаусса, можно решить ряд важных задач.

Когда напряженность поля не зависит от расстояния до заряда? Выясним картину электростатического поля заряженной плоской металлической пластины. Так как пластина металлическая, то силовые линии перпендикулярны ее поверхности и, следовательно, параллельны друг другу. На рисунке 151, а, б показана картина силовых линий полей положительно и отрицательно заряженных пластин. Видно, что густота силовых линий повсюду одинакова, а это значит, что и модуль напряженности во всех точках поля одинаков и *не зависит от их расстояния до пластины*. Такое поле, напряженность которого во всех его точках одинакова, называется *однородным электростатическим полем*. Заряженная плоскость и создает однородное поле. Графически однородное электростатическое поле изображается параллельными силовыми линиями.

Найдем теперь модуль напряженности электростатического поля, создаваемого заряженной пластиной.

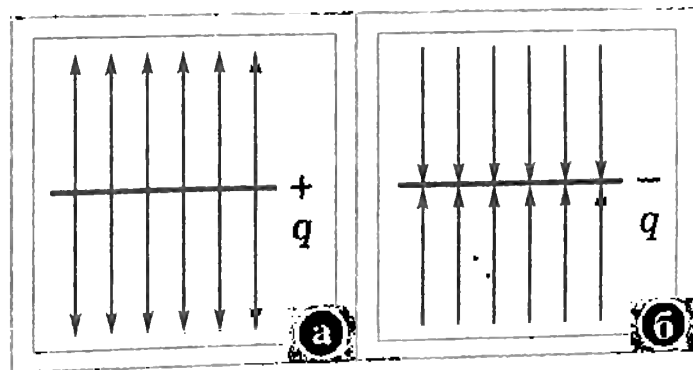


Рис. 151

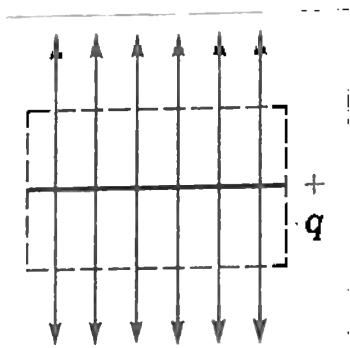


Рис. 152

Для этого, как мы знаем, нужно окружить пластину замкнутой поверхностью, через которую силовые линии проходят под прямым углом к ней. Для пластины такой поверхностью служит параллелепипед с основаниями, параллельными пластине. Силовые линии пересекают под прямым углом только эти два основания (рис. 152); их площадь равна $2S$ — удвоенной площади пластины. Остальные стороны параллелепипеда параллельны силовым линиям. Таким образом, мы можем написать формулу для потока силовых линий в виде

$$E \cdot 2S = \frac{q}{\epsilon_0},$$

где q — заряд пластины. Отсюда получаем:

$$E = \frac{q}{2\epsilon_0 S}. \quad (2)$$

В эту формулу не входит расстояние от пластины. Это и означает, что электростатическое поле заряженной пластины однородное.

(Заметим, что формула (2) справедлива и для непроводящей пластины, если заряд на ней распределен равномерно.)

Однородность электростатического поля заряженной пластины нарушается у ее краев, где силовые линии, входящие в пластину или выходящие из нее, не могут быть параллельны всем остальным линиям. Но если рассматривать поле вблизи от пластины, т. е. на расстояниях от нее, малых по сравнению с ее размерами, то влиянием краев можно пренебречь и поле может считаться вполне однородным.

Плоский конденсатор. Электростатическое поле заряженной пластины простирается до бесконечности. Однако можно создать и такое однородное поле, которое будет ограничено определенным заданным объемом. Это удастся сделать с помощью двух параллельных металлических пластин, несущих одинаковые по абсолютному значению, но противоположные по знаку заряды. Такая система двух пластин называется *плоским конденсатором*.

Выясним, какова картина силовых линий поля в плоском конденсаторе и чему равна напряженность этого поля.

Каждая из пластин конденсатора создает уже известное нам поле (см. рис. 151). Расположим теперь две такие пластины параллельно друг другу, как это показано на рисунке 153. Мы видим, что в пространстве между пластинами силовые линии

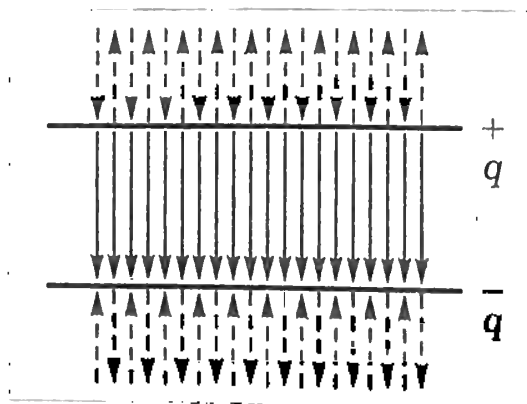


Рис. 153

полей обеих пластин направлены одинаково — от положительно заряженной пластины к заряженной отрицательно. Это значит, что напряженность поля внутри конденсатора будет вдвое больше, чем напряженность поля одной из пластин. Электростатическое поле внутри конденсатора тоже однородное, его силовые линии параллельны друг другу.

Модуль напряженности поля $\vec{E}$ вдвое больше модуля напряженности поля, создаваемого одной пластиной. Следовательно, в плоском конденсаторе

$$E = \frac{q}{\epsilon_0 S}.$$

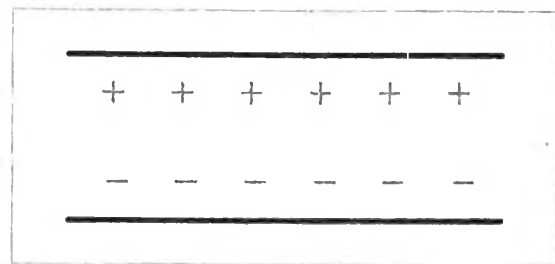


Рис. 154

Вне конденсатора поле отсутствует. Действительно, когда две металлические пластины, заряды которых противоположны по знаку, образуют плоский конденсатор, то взаимное притяжение зарядов приводит к тому, что они располагаются на внутренних поверхностях пластин (рис. 154). На внешних же поверхностях зарядов не будет, и вне конденсатора «некому» создавать поле.

Это тоже следует из теоремы Гаусса. Суммарный заряд обеих пластин конденсатора равен нулю. Следовательно, поток силовых линий через любую замкнутую поверхность, окружающую конденсатор, равен нулю, а значит, напряженность поля вне конденсатора равна нулю.

Поле плоского конденсатора тем и интересно, что оно ограничено объемом пространства между пластинами, а не простирается до бесконечности, как в случае одной пластины. С этим связаны и практические применения конденсаторов. С этим связано и само название «конденсатор»: он «конденсирует» (сгущает) силовые линии в ограниченном объеме между пластинами.

Однородность поля в плоском конденсаторе, так же как и поля одной заряженной пластины, нарушается у краев конденсатора. Но если расстояние между пластинами мало по сравнению с размерами пластин, то поле внутри конденсатора можно считать однородным.

■ ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Найдите напряженность поля, создаваемого положительно заряженным проводящим шаром радиусом r , если его заряд равен q . Вычислите напряженность поля в точке M на расстоянии d от поверхности шара.

Решение. Мы знаем, что внутри шара поля нет. Вне шара поле существует, и так как шар проводящий, то силовые линии всюду направлены перпендикулярно его поверхности, т. е. вдоль радиусов (рис. 155).

Проведем через точку M замкнутую поверхность перпендикулярно силовым линиям поля. Такой поверхностью служит сфера радиусом $R = r + d$, концентрическая шару (см. рис. 155).

Площадь ее $S = 4\pi R^2$.

Из уравнения (1) следует, что

$$E = \frac{q}{\epsilon_0 S} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 R^2}.$$

Заряженный шар создает вокруг себя же электростатическое поле, как точечный заряд, помещенный в центре шара.

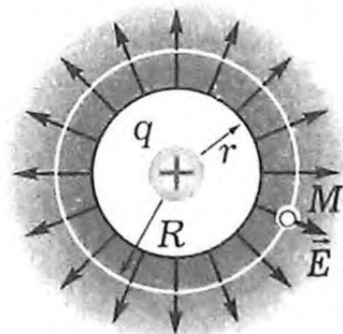


Рис. 155

Электрические заряды на проводнике располагаются на его поверхности. Но как они распределяются на ней? Как это распределение влияет на электростатическое поле вокруг проводника?

Если проводник имеет форму шара (сферы) или плоскости, то заряд распределяется на поверхности проводника равномерно, т. е. на каждый элемент поверхности единичной площади приходится одинаковый заряд. Как говорят, *поверхностная плотность* заряда повсюду на поверхности такого проводника одинакова. Но если в разных местах поверхности проводника кривизна разная, то заряды на такой поверхности размещаются неравномерно. Поверхностная плотность заряда σ распределена на проводящей по-

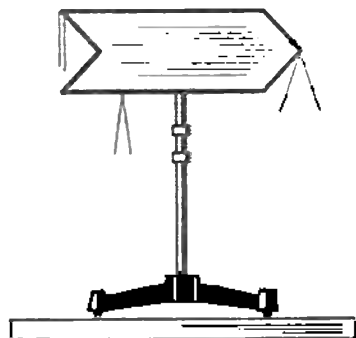


Рис. 156

верхности обратно пропорционально радиусу шара r . Какой сложной формой ни обладало бы проводящее тело, поверхностная плотность заряда будет больше в тех местах, где меньше радиус этого тела. Зависимость $\sigma(r)$ можно проиллюстрировать на опыте. Полый алюминиевый цилиндр с острием и вогнутой частью (рис. 156), укрепленный на ножке из изолятора, заряжается от электрофорной машины или генератора «Разряд». В разных частях шара приклеены одним концом бумажные листочки. Опыт показывает, что наибольшее отклонение листочков происходит у острия цилиндра, а во внутренней полости листочки

не отклоняются вообще. Строгое объяснение этому опыту можно дать только после введения понятия потенциала электрического поля. Это понятие будет введено в следующей главе. Из выражения, полученного в предыдущем параграфе для шара радиусом r , $E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2}$ легко получить выражение

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0},$$

из которого следует, что чем больше поверхностная плотность заряда σ , тем больше напряженность поля E . Другими словами, напряженность электрического поля больше на участках проводящей поверхности с большей кривизной. Этот вывод и демонстрируется с помощью описанного опыта.

Острие. Чрезвычайно большой напряженностью электростатического поля может стать около острия на заряженном проводнике, потому что острие — это место с очень большой кривизной и на нем плотность заряда особенно велика. Из-за этого у острия происходит любопытное и практически очень важное явление. Состоит оно в следующем.

Допустим, что какой-то проводник с острием заряжен отрицательно. В окружающем атмосферном воздухе всегда есть небольшое число электронов и положительно заряженных ионов. Их присутствие в воздухе вызвано действием космических лучей и радиоактивных излучений, исходящих от Земли. Число их настолько мало, что они не мешают воздуху быть отличным изолятором. Но в сильном электрическом поле около острия эти немногие электроны и ионы ускоряются и приобретают такие большие скорости, что, сталкиваясь с нейтральными частицами воздуха, расщепляют их, что приводит к лавинообразному росту числа положительно заряженных ионов

и отрицательных электронов. Положительно заряженные частицы из этой лавины теперь притягиваются к отрицательно заряженному острию и нейтрализуют его, так что отрицательный заряд его исчезнет. Дело выглядит так, как будто бы заряд стекает с острия. Но на самом деле никакого стекания нет. Наоборот, к острию притекает заряд противоположного знака.

Молниеотвод. На этом свойстве острия основано действие молниеотвода (раньше его называли громоотводом). Это устройство служит для защиты зданий и других сооружений от ударов молний во время грозы. Молниеотвод представляет собой металлический стержень, один конец которого приводится в хороший контакт с землей, а другой, заостренный, возвышается над защищаемым зданием.

Как действует молниеотвод? Допустим, что к защищаемому молниеотводом зданию приближается сильно заряженное облако (облака часто несут на себе, особенно в теплое время года, большие заряды). Пусть, например, заряд облака положительный. Электростатическое поле облака вызывает разделение зарядов в молниеотводе, так что на обращенном вверх острие возникает отрицательный заряд.

В сильном поле острия образуется, как мы только что видели, множество положительно и отрицательно заряженных частиц. Отрицательно заряженные частицы движутся к облаку и по крайней мере частично нейтрализуют его. Тем самым значительно уменьшается вероятность удара молнии — явления далеко не безопасного, хотя и очень эффектного. О молнии более подробно рассказано в главе 21.

Описанное здесь свойство острия используется в устройствах для очистки газов, выбрасываемых промышленными предприятиями, в пылеуловителях, электрофильтрах и т. д. А защита окружающей среды от загрязнений едва ли не самая важная задача науки и техники в наше время.

■ ВОПРОСЫ

1. Что такое поверхностная плотность электрического заряда? 2. Всегда ли поверхностная плотность заряда на проводнике одинакова на всей его поверхности? 3. Почему у острия на поверхности заряженного проводника велика напряженность электростатического поля? 4. Однородно или неоднородно электростатическое поле у острия? 5. Почему иногда говорят, что с острия стекает заряд? 6. Как действует молниеотвод? 7. Если острие заряжено положительно, то на нем начинаются силовые линии поля. Где они заканчиваются? Где начинаются силовые линии поля отрицательно заряженного острия?



Самое важное в пятнадцатой главе

Влияние одного заряда на другой передается электростатическим полем, которое создается зарядами. Поле — особый вид материи. Оно существует независимо от того, находятся в нем пробные заряды или их нет.

Существование электростатического поля можно обнаружить только по силе, с которой оно действует на помещенные в него электрические заряды.

Электростатическое поле в данной точке характеризуется напряженностью поля $\vec{E}$ — величиной, равной отношению силы $\vec{F}$, действующей на положительный заряд Q в данной точке поля, к значению самого заряда: $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q}$.

Модуль напряженности электростатического поля, созданного точечным зарядом q на расстоянии r от заряда, вычисляется по формуле $E = k \frac{|q|}{r^2}$.

Для наглядного изображения электростатического поля служат силовые линии. Это линии, направления касательных к которым в каждой точке поля совпадают с направлением напряженности поля в этой точке. Густота силовых линий определяет модуль напряженности поля.

Поток вектора напряженности электрического поля Φ через любую поверхность площадью S , перпендикулярную силовым линиям, равен ES , где E — модуль напряженности поля.

Если силовые линии составляют угол α с нормалью к поверхности, то поток Φ через поверхность равен $ES \cos \alpha$.

Поток вектора напряженности электрического поля Φ через замкнутую поверхность, внутри которой находится заряд q (не обязательно точечный), равен $\Phi = \frac{\sum q}{\epsilon_0}$ (теорема Гаусса).

Внутри любого проводника, помещенного в электростатическое поле, поля нет. Поле не проникает внутрь проводника независимо от того, заряжен сам проводник или нет. В любом заряженном проводнике заряды располагаются на внешней поверхности.

Равномерно заряженная плоскость площадью S создает однородное электростатическое поле напряженностью $\vec{E}$, модуль которой равен $\frac{|q|}{2\epsilon_0 S}$, где $|q|$ — модуль заряда плоскости.

Напряженность поля внутри плоского конденсатора с зарядом пластин $+|q|$ и $-|q|$ и площадью пластин S равна по модулю $\frac{|q|}{\epsilon_0 S}$. Вне плоского конденсатора поля нет.

Из одинаковых законов — одинаковые следствия

Мы уже указывали на сходство законов взаимодействия электрически заряженных тел (зарядов) и массивных тел (масс). Заряды взаимодействуют по закону Кулона:

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

Тела взаимодействуют по закону Ньютона:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}.$$

В сущности закон взаимодействия один и тот же: сила обратно пропорциональна квадрату расстояния. Но из одинаковых законов взаимодействия должны вытекать и одинаковые следствия.

В курсе физики IX класса мы выяснили, что:

1. Работа силы всемирного тяготения, в частности силы тяжести, при перемещении тела из одной точки пространства в другую не зависит от траектории тела, а определяется только начальным и конечным положениями этих точек. Отсюда следует, что работа силы тяжести при перемещении тела по замкнутому пути равна нулю.

2. В каждой точке пространства тело, на которое действует сила тяжести, обладает потенциальной энергией относительно произвольно выбранного нулевого уровня. Эта потенциальная энергия равна работе, которая была бы совершена при переходе тела из данной точки на нулевой уровень (нулевую точку).

3. Работа силы тяжести при перемещении тела равна изменению потенциальной энергии тела, взятому с противоположным знаком.

Все перечисленные свойства силы тяжести следуют из закона всемирного тяготения Ньютона.

Эти же следствия должны относиться и к электростатическим силам, а значит, и к электростатическому полю, поскольку мы знаем, что именно поле действует на заряд электростатической силой.

Применительно к электростатическому полю указанные свойства можно сформулировать в следующем виде.

1. Работа, совершаемая электростатическим полем при перемещении заряда, не зависит от траектории заряда, а определяется только его начальным и конечным положениями. Работа при перемещении заряда в электростатическом поле по замкнутой траектории равна нулю.

2. В каждой точке электростатического поля электрический заряд q обладает потенциальной энергией относительно произвольно выбранной нулевой точки. Эта потенциальная энергия равна работе, которая была бы совершена электростатическим полем при перемещении заряда q из данной точки в нулевую точку.

3. Работа, совершаемая электростатическим полем при перемещении заряда, равна изменению потенциальной энергии заряда, взятому с противоположным знаком.

§ 77

Работа при перемещении заряда в электростатическом поле

Как определяется работа, совершаемая при перемещении заряда в электростатическом поле? Чтобы ответить на этот вопрос, рассмотрим для простоты однородное поле, созданное, например, в плоском конденсаторе, т. е. поле, где сила, действующая на данный заряд, всюду одинакова. Напомним, что в курсе физики IX класса мы тоже рассматривали работу силы тяжести вблизи поверхности Земли, где эта сила тоже всюду одинакова.

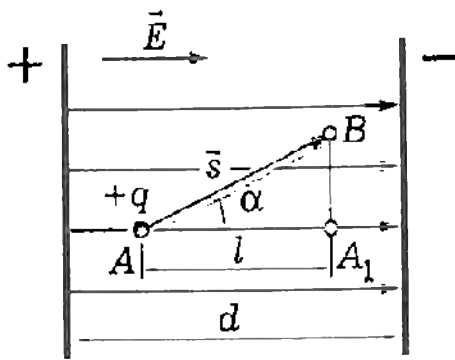


Рис. 157

На рисунке 157 изображен заряженный плоский конденсатор, в точку A поля которого помещен положительный заряд q .

Представим себе, что потребовалось переместить этот заряд в другую точку B поля. Какую работу нужно для этого совершить? Так как работа перемещения заряда в электростатическом поле не зависит от его траектории, то достаточно вычислить эту работу в случае, когда заряд перемещается вдоль прямой AB .

Из курса физики IX класса мы знаем, что работа A , совершаемая силой $\vec{F}$ при перемещении $\vec{s}$, равна:

$$A = Fs \cos \alpha,$$

где α — угол между векторами $\vec{s}$ и $\vec{F}$.

В нашем случае сила $\vec{F}$, действующая на заряд q , равна $\vec{F} = \vec{E}q$, где $\vec{E}$ — напряженность электростатического поля. Перемещение заряда равно $\vec{s} = \vec{AB}$. Следовательно,

$$A = qEs \cos \alpha.$$

Из рисунка видно, что $s \cos \alpha = AA_1$ есть проекция вектора перемещения $\vec{s}$ на направление силовых линий поля. Обозначим ее буквой l :

$$l = s \cos \alpha$$

(если угол α острый, то проекция $l > 0$; если угол α тупой, то $l < 0$). Тогда работа, совершаемая силой, действующей на заряд со стороны электростатического поля на перемещении $\vec{AB}$, равна:

$$A = Elq. \quad (1)$$

Если бы заряд q перемещался не из A в B , а из B в A , то работа изменила бы знак.

Чтобы лучше понять смысл формулы (1), представим себе, что заряд q перемещается вдоль самой силовой линии, тогда проекция вектора перемещения равна длине самого перемещения s ($\alpha = 0$, $\cos \alpha = 1$). И чтобы перенести заряд q с левой пластины конденсатора на правую (по любой траектории), поле совершит работу $A = Edq$, где d — расстояние между пластинками. При перемещении заряда перпендикулярно силовым линиям электростатическое поле никакой работы не совершает:

$$A = 0 \quad (\alpha = \frac{\pi}{2}, \quad \cos \alpha = 0).$$

Легко вычислить теперь работу электростатического поля при перемещении заряда q по замкнутой траектории ABA_1A (см. рис. 157):

$$A = A_{AB} + A_{BA_1} + A_{A_1A} = Elq + 0 - Elq = 0.$$

Мы лишь подтвердили этим расчетом, что работа электростатического поля при перемещении заряда по замкнутой траектории равна нулю.

Поле, работа которого при перемещении зарядов по любой замкнутой траектории равна нулю, называется потенциальным полем. Электростатическое и гравитационное поля являются потенциальными полями.

Электрическое напряжение. В предыдущей главе для характеристики поля мы ввели физическую величину — напряженность $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$. Она показывает, с какой силой поле в данной точке действует на заряд 1 Кл. Напряженность поля $\vec{E}$ можно назвать *силовой характеристикой самого поля*, поскольку она не зависит от значения заряда q .

Теперь, когда мы выяснили, что поле совершает работу A при перемещении в нем заряда q , можно ввести еще одну физическую величину, не зависящую от значения заряда q . Из формулы (1) видно, что этой величиной может служить отношение

$$\frac{A}{q} = El. \quad (2)$$

Смысл ее ясен: это работа, которая совершается при перемещении положительного заряда 1 Кл из точки A электростатического поля в точку B того же поля (см. рис. 157).

Эту величину называют *электрическим напряжением* между этими точками и обозначают буквой U :

$$U = \frac{A}{q}. \quad (3)$$

Из формул (2) и (3) видно, что для однородного поля

$$U = El. \quad (4)$$

Электрическое напряжение между двумя точками однородного поля равно произведению модуля напряженности поля и проекции вектора перемещения заряда из одной точки в другую на направление поля.

Напряжение может быть как положительной, так и отрицательной величиной. Напряжение между произвольными точками A и B поля положительно, если проекция перемещения $\vec{AB}$ на направление поля положительна. Если же эта проекция отрицательна, то напряжение между точками A и B отрицательно.

Обозначим напряжение между точками A и B через U_{AB} , а между точками B и A через U_{BA} , тогда

$$U_{AB} = -U_{BA}.$$

Так как силовые линии поля направлены от положительно заряженного тела к отрицательно заряженному, то напряжение между положительно и отрицательно заряженными телами всегда положительно и, наоборот, между отрицательно и положительно заряженными телами оно отрицательно.

Выражение (3) позволяет установить единицу напряжения.

В СИ работа выражается в джоулях, а заряд — в кулонах. Значит, за единицу электрического напряжения между двумя точками принимается напряжение, при котором для перемещения положительного заряда 1 Кл от одной точки поля к другой совершается работа 1 Дж. Эта единица называется *вольт* (обозначается: В). $1 \text{ В} = 1 \text{ Дж/Кл}$.

Пользуясь формулой (3), можно выразить работу A перемещения заряда q в электрическом поле через напряжение U между точками поля, которыми определяется это перемещение:

$A = Uq.$

(5)

Из равенства (5) видно, что **знак** совершаемой работы зависит как от знака перемещаемого заряда q , так и от знака напряжения U . При перемещении **положительного** заряда знак совершаемой работы совпадает со знаком напряжения. Когда в поле перемещается отрицательный заряд, знак совершаемой работы противоположен знаку электрического напряжения, мы уже **знаем**. Как определяется знак электрического напряжения, мы уже **знаем**.

Напряженность и напряжение. Формула (4) позволяет найти связь между напряженностью поля и напряжением:

$$E = \frac{U}{l}, \quad (6)$$

т. е. модуль напряженности поля пропорционален напряжению.

На основе этого равенства устанавливается еще одна единица напряженности, которой пользуются чаще, чем известной нам единицей ньютон на кулон. Из равенства (6) видно, что такой единицей может служить вольт на метр.

1 В/м — это напряженность такого однородного поля, в котором на участке длиной 1 м вдоль поля напряжение равно 1 В.

■ ВОПРОСЫ

1. Как выражается работа перемещения заряда в электростатическом поле через напряженность поля? 2. Как связаны напряженность поля и напряжение? 3. В каких единицах выражается напряженность поля? 4. В тексте параграфа показано, что работа перемещения заряда q из точки A в точку B (см. рис. 157) равна Elq . Чему равна работа перемещения того же заряда из точки B в точку A ? 5. Напряжение между точками A и B поля (см. рис. 157) равно произведению El . Чему равно напряжение между точками B и A ?

■ УПРАЖНЕНИЕ 30

1. Чтобы в воздухе при атмосферном давлении проскочила искра, в нем должно быть электростатическое поле напряженностью не менее чем $3 \cdot 10^6$ В/м. Каково напряжение во время грозы между облаком и землей, если длина искры, т. е. молнии, равна 400 м? 2. Плоский конденсатор заряжен так, что напряжение между его пластинами равно 1000 В. Чему равна напряженность поля в конденсаторе, если расстояние между пластинами равно 1 мм? 3. Расстояние между пластинами плоского конденсатора равно 1 см, а напряженность поля равна $6 \cdot 10^5$ В/м. Чему равно напряжение между пластинами?

§ 78

Напряжение между точками проводника.

Измерение электрического напряжения

Мы уже знаем (см. § 74), что внутри сплошного или полого проводника электростатического поля нет ($\vec{E} = 0$). Очевидно, и напряжение между любыми точками A и B проводника тоже равно нулю, так как $U = El$. Этот вывод справедлив как для незаряженного проводника, помещенного в электростатическое поле, так и для заряженного проводника, который сам создает вокруг себя поле.

Это свойство проводников можно использовать для измерения напряжения уже известным нам электроскопом. Только для этого электроскоп должен быть снабжен проводящим (металлическим) защитным корпусом.

Допустим, что нам нужно измерить напряжение между двумя заряженными проводниками, например A и B . Соединим проводник A метал-

лическим проводом со стержнем электроскопа (рис. 158), а проводник B с корпусом (он должен быть изолирован), тогда напряжение между проводником A и стержнем, так же как и между корпусом и проводником B , будет равно нулю. Значит, напряжение между проводниками в точности равно напряжению между стержнем и корпусом электроскопа.

Но если между стержнем и корпусом электроскопа существует электрическое напряжение, значит, между ними внутри электроскопа имеется и электростатическое поле. Под действием этого поля стрелка отклонится на некоторый угол, тем больший, чем больше напряженность этого поля. А напряженность поля пропорциональна напряжению. Снабдив прибор шкалой и проградуировав ее, можно отсчитывать по шкале напряжение. Электроскоп, снабженный защитным корпусом и шкалой и пригодный для измерения напряжения между проводниками, называется *электрометром*.

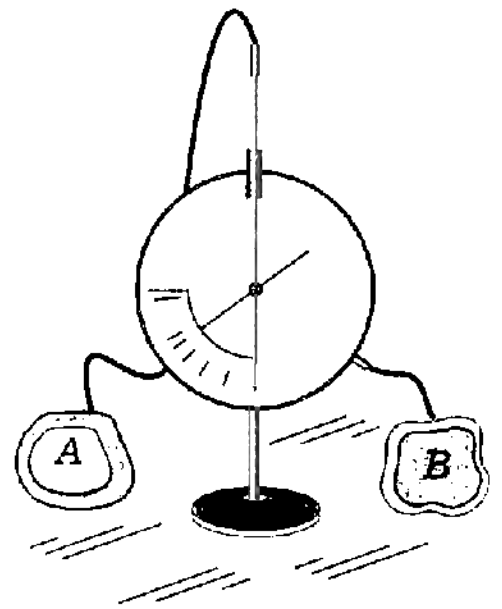


Рис. 158

Для той же цели применяются и другие приборы, например вольтметры, но при измерении напряжения вольтметрами через них протекает электрический ток, что уменьшает точность измерения.

Так как напряжение связано с напряженностью поля ($U = El$), то, измерив U , можно найти и E . Это тем более важно, что специальных приборов для измерения E не существует.

§ 79

Потенциальная энергия электрического заряда в электростатическом поле. Потенциал точки поля

Напомним, что потенциальная энергия заряда q в данной точке поля равна работе, которая совершается при перемещении заряда из этой точки поля в произвольно выбранную нулевую точку. Нулевой эта точка называется потому, что потенциальную энергию заряда, помещенного в нулевую точку, *условливаются* считать равной нулю.

Отсюда следует, что потенциальная энергия заряда в данной точке поля зависит от выбора (произвольного!) нулевой точки и до ее выбора не имеет определенного значения.

Выбор нулевой точки. Мы знаем уже, что нулевая точка выбирается произвольно. Но в электротехнике условились несколько ограничить этот произвол. Так, в технике принято считать нулевой точкой любую заземленную точку, т. е. всякую точку, соединенную проводником с землей. Считается, что потенциальная энергия заземленного тела (а значит, и самой земли), находящегося в электростатическом поле, равна нулю.

В физике за начало отсчета потенциальной энергии принимается любая точка, бесконечно удаленная от зарядов, создающих поле.

Если условиться о выборе нулевой точки, то потенциальная энергия (заряда q , заряженного тела) в любой точке поля становится определенной величиной. Обозначим ее W_p . Энергию заряда можно вычислить, измерив электрометром напряжение U между зарядом и нулевой точкой, т. е.

работу перемещения положительного заряда 1 Кл из данной точки поля в нулевую точку. А потенциальная энергия W_p заряда q , равная работе его перемещения в нулевую точку, определится выражением

$$W_p = A = Uq. \quad (1)$$

Потенциал электростатического поля. Чтобы сравнивать между собой любые точки поля, надо найти величину, не зависящую от заряда q , помещенного в эти точки.

Такую величину мы найдем, разделив обе части равенства (1) на заряд q , в результате чего получим:

$$\frac{W_p}{q} = U. \quad (2)$$

Отношение $\frac{W_p}{q}$ не зависит от q . Как и раньше, заряду q приписывается знак «+». Это отношение, равное напряжению U между точкой поля и нулевой точкой, получило специальное название: *потенциал данной точки поля* — и обозначается греческой буквой φ (фи):

$$\frac{W_p}{q} = \varphi. \quad (3)$$

Потенциалом данной точки поля называется величина, равная отношению потенциальной энергии положительного заряда, помещенного в эту точку, к значению самого заряда.

Из этого определения следует, что потенциал φ поля в данной точке численно равен потенциальной энергии единичного положительного заряда, помещенного в эту точку поля, т. е. потенциал φ данной точки поля численно равен работе перемещения единичного положительного заряда в нулевую точку.

В отличие от напряженности поля, представляющей собой силовую характеристику поля, потенциал — это его *энергетическая характеристика*.

Распределение зарядов на поверхности проводящего шара. Пусть шару сообщили заряд Q . Поверхностная плотность заряда на поверхности шара радиусом R равна:

$$\sigma = \frac{Q}{4\pi R^2}. \quad (1)$$

Напряженность электрического поля, создаваемая заряженным шаром вблизи его поверхности, равна:

$$E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R^2}. \quad (2)$$

Потенциал заряженного шара можно рассчитать по формуле¹

¹ Этот **результат** строго можно получить только с помощью интегрирования вдоль **любого пути** от поверхности шара до бесконечности, так как работа сил потенциального электрического поля не зависит от формы траектории:

$$\varphi = \int_R^\infty \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} dr = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R}.$$

$$\varphi = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R}. \quad (3)$$

Из выражений (1) и (3) следует

$$\varphi = \frac{\sigma R}{\epsilon_0} \Rightarrow \sigma = \frac{\varphi \epsilon_0}{R}.$$

Из полученного выражения можно сделать важный вывод. При заданном потенциале поверхностная плотность заряда обратно пропорциональна радиусу шара. Этот результат имеет общий характер, так как для проводящих тел потенциал всех точек поверхности одинаков, какая бы сложная форма не была у этих тел. Именно поэтому в опыте, рассмотренном в предыдущей главе (см. рис. 156), лепестки расходились больше там, где был меньше радиус кривизны $\sigma \sim \frac{\epsilon_0 \varphi}{r}$, и поэтому на острие

заряженного проводника поверхностная плотность заряда станет настолько большой, что заряды с него начнут стекать, так как вблизи острия будет большая напряженность электрического поля. На рисунке 159 представлено колесо Франклина, которое приходит во вращение благодаря так называемому электрическому ветру, образуемому наэлектризованными молекулами воздуха, хотя на первый взгляд кажется, что этот ветер образуют электроны. Критериальный опыт для разрешения этой проблемы можно поставить, откачав воздух из-под колокола, в котором находится колесо Франклина, — оно не будет вращаться!

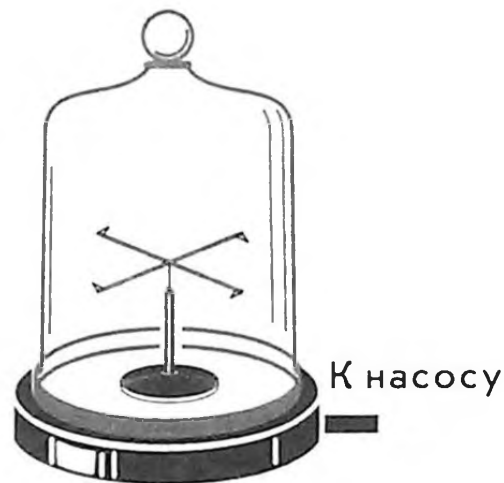


Рис. 159

этой проблемы можно поставить, откачав воздух из-под колокола, в котором находится колесо Франклина, — оно не будет вращаться!

Потенциал и напряжение. Мы уже знаем, что работа перемещения заряда q из одной точки поля в другую равна:

$$A = Uq,$$

где U — напряжение между этими точками. С другой стороны, работа A перемещения заряда равна взятому с противоположным знаком изменению потенциальной энергии. Обозначим через W_{p_1} и W_{p_2} потенциальные энергии заряда q в начальной и конечной точках траектории заряда. Тогда изменение его потенциальной энергии равно $W_{p_2} - W_{p_1}$, а совершенная работа

$$A = -(W_{p_2} - W_{p_1}) = W_{p_1} - W_{p_2}.$$

Но $\frac{W_{p_1}}{q} = \varphi_1$, а $\frac{W_{p_2}}{q} = \varphi_2$, где φ_1 и φ_2 — значения потенциалов поля в тех же точках.

Отсюда следует, что работа перемещения заряда q из одной точки поля в другую равна:

$$A = (\varphi_1 - \varphi_2) q, \quad (4)$$

где $\varphi_1 - \varphi_2$ — это разность потенциалов между точкой, откуда переносится заряд, и точкой, куда он переносится.

Сравнив формулы (4) и (1), мы видим, что разность потенциалов $\varphi_1 - \varphi_2$ равна напряжению U между точками как по модулю, так и по знаку:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = U.$$

Так как вдоль силовых линий поля напряжение $U > 0$, то, перемещаясь в этом направлении, мы заметим, что потенциал уменьшается от значения φ_1 до φ_2 . В точках поля, расположенных на линии, перпендикулярной силовым линиям, потенциал одинаков (разность потенциалов между ними равна нулю). Это имеет место для проводников, где, как мы видели (см. рис. 148), силовые линии поля всюду направлены перпендикулярно поверхности проводника. Потенциал всех точек проводника один и тот же.

■ ВОПРОСЫ

1. Что такое потенциал электростатического поля? В каких единицах он выражается?
2. Какие две величины характеризуют любую точку электростатического поля? В чем их различие?
3. Что такое электрическое напряжение? разность потенциалов? В каких единицах выражаются эти величины?
4. В каких точках поля плоского конденсатора потенциал выше: вблизи положительно или отрицательно заряженной пластины?
5. Свободная положительно заряженная частица проходит некоторый путь в электростатическом поле. В какой точке траектории — начальной или конечной — потенциал выше?
6. Отрицательно заряженная частица проходит некоторый путь в электростатическом поле. В какой точке траектории — начальной или конечной — потенциал поля выше?
7. Почему работа перемещения заряда в электростатическом поле не зависит от формы и длины траектории?
8. Чему равна работа перемещения заряда в электростатическом поле по замкнутому пути?

■ ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

1. Между пластинами конденсатора, к которому приложена разность потенциалов 12,25 кВ, висит, не падая, пылинка массой $2 \cdot 10^{-14}$ кг. Расстояние между пластинами конденсатора 5 см. Чему равен электрический заряд пылинки?¹

Решение. На пылинку в электростатическом поле конденсатора действует электростатическая сила $\vec{F}_э = q\vec{E}$, где q — заряд пылинки и $\vec{E}$ — напряженность поля в конденсаторе. Кроме того, на нее действует сила тяжести $\vec{F}_т = m\vec{g}$, где m — масса пылинки. Так как пылинка находится в равновесии, то сила $q\vec{E}$ направлена вертикально вверх, а по модулю равна mg :

$$qE = mg.$$

Но $E = \frac{U}{d}$, где U — напряжение между пластинами (разность потенциалов) и d — расстояние между пластинами. Поэтому можно записать:

$$\frac{qU}{d} = mg, \quad \text{откуда} \quad q = \frac{mgd}{U}.$$

¹ Опыт, описанный в задаче, был в начале нашего столетия использован американским физиком Р. Милликееном и русским физиком А. Ф. Иоффе для точного измерения заряда электрона.

Подставив в последнюю формулу данные из условия задачи, получим:

$$q = \frac{2 \cdot 10^{-14} \text{ кг} \cdot 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot 5 \cdot 10^{-2} \text{ м}}{1,225 \cdot 10^4 \text{ В}} = 8 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}$$

2. Электрон, обладающий энергией 1500 эВ, влетает в электрическое поле конденсатора под углом 15° к его пластинам. Расстояние между пластинами $d = 5$ см, а длина пластин $l = 10$ см. Чему равно напряжение между пластинами, если электрон вылетает из конденсатора параллельно пластинам? Заряд электрона $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Решение. Траектория движения электрона в поле конденсатора подобна траектории тела, брошенного под углом к горизонту в поле силы тяжести, — параболе (рис. 160).

Напряжение находим по формуле $U = Ed$, если известна напряженность, равная $E = \frac{F}{q}$, а сила по второму закону Ньютона равна $F = ma$. Тогда получим:

$$U = \frac{Fd}{q} = \frac{mad}{q}. \quad (1)$$

Массу электрона находим, используя формулу энергии $W = \frac{mv^2}{2}$, а ускорение — используя формулы равноускоренного движения из кинематики.

Для рассмотрения движения электрона введем систему координат, направив ось X вдоль пластин, а ось Y — перпендикулярно пластинам.

Так как вдоль оси Y электрон движется с ускорением (в этом направлении действует постоянная сила), то проекция скорости на ось Y равна:

$$v_y = v_{0y} - at.$$

Учитывая, что $v_{0y} = v_0 \sin \alpha$, получим:

$$v_y = v_0 \sin \alpha - at. \quad (2)$$

Конечная скорость электрона при вылете его из конденсатора направлена горизонтально. Значит, ее проекция на ось Y равна $v_y = 0$. Тогда из формулы (2) получим:

$$a = \frac{v_0 \sin \alpha}{t}. \quad (3)$$

Начальную скорость v_0 электрона находим из формулы кинетической энергии, время t — по формуле равномерного движения для

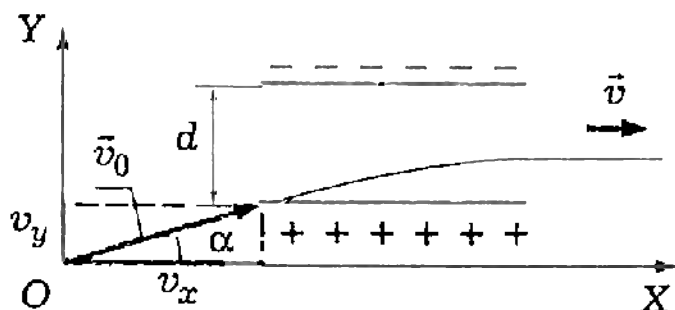


Рис. 160

проекция перемещения вдоль оси X , так как в этом направлении на электрон не действует сила. Учитывая это, можно записать:

$$l = v_{0x}t, \text{ или } l = v_0 \cos \alpha \cdot t. \quad (4)$$

Подставляя время, найденное по формуле (4) $t = \frac{l}{v_0 \cos \alpha}$, в выражение (3) и учитывая, что $2 \sin \alpha \cos \alpha = \sin 2\alpha$, получим для ускорения:

$$a = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{2l}. \quad (5)$$

Объединяя выражения (1) и (5), находим:

$$U = \frac{mv_0^2 \cdot d \cdot \sin 2\alpha}{2ql} \quad \text{и} \quad U = \frac{W \cdot d \cdot \sin 2\alpha}{ql}.$$

■ УПРАЖНЕНИЕ 31

1. Электрическое напряжение на участке поля AB равно 110 В. Какая работа совершается полем при перемещении из точки A в точку B заряда $q = 11$ Кл? заряда $q = -12$ Кл?
2. В электростатическом поле, созданном положительным зарядом, в точке с потенциалом ϕ находится отрицательный заряд q . Чему равна потенциальная энергия заряда в этой точке? Каков знак энергии?
3. Плоский конденсатор состоит из двух пластин площадью 200 см^2 каждая. Заряд на пластинах по модулю равен $2,6 \cdot 10^{-6}$ Кл. Каково напряжение между пластинами, если расстояние между ними равно 0,5 см?

§ 80 Электрическая емкость. Конденсатор

Заряд и напряжение. Электрическое поле существует вокруг заряженного тела, например вокруг заряженного проводника. А чтобы зарядить тело, на него нужно перенести заряд с какого-то другого тела, у которого при этом появится такой же заряд, но другого знака. Между телами возникает электрическое напряжение. Оно, конечно, будет тем больше, чем больше заряд на заряженных телах.

В электротехнических и радиотехнических устройствах требуется сообщать проводникам сравнительно большие заряды при достаточно малых напряжениях между ними (при чрезмерно больших напряжениях в воздухе, например, может проскочить искра). Для этого используются конденсаторы. *Конденсатором* называется система двух изолированных друг от друга проводников — *обкладок* конденсатора. Между ними может быть вакуум, воздух (что почти одно и то же) или какое-нибудь другое непроводящее вещество.

Когда обкладкам конденсатора сообщены разноименные заряды $+|q|$ и $-|q|$, между ними возникает электрическое напряжение (разность потенциалов). Если при этом требуется, чтобы напряжение было не слишком большим при значительном заряде, то это означает, что большим должно быть отношение $\frac{q}{U}$. Обозначим его буквой C :

$$C = \frac{q}{U}. \quad (1)$$

Величину, равную этому отношению, называют *электрической емкостью*.

Плоский конденсатор. Емкость плоского конденсатора зависит главным образом от его геометрических размеров. В самом деле, если на обкладках конденсатора заряды равны $+|q|$ и $-|q|$, то между ними существует электростатическое поле напряженностью $\vec{E}$, по модулю равной

$$E = \frac{|q|}{\varepsilon_0 S}, \quad (2)$$

где S — площадь каждой из пластин. Напряжение U между обкладками равно:

$$U = Ed, \quad (3)$$

где d — расстояние между пластинами. Из формул (2) и (3) получаем:

$$|q| = \frac{\varepsilon_0 S}{d} U.$$

Отсюда емкость плоского конденсатора равна:

$$C = \frac{\varepsilon_0 S}{d}. \quad (4)$$

Как видно из формулы, емкость C зависит только от размеров конденсатора: площади S его обкладок и расстояния d между ними, если пластины находятся в вакууме. Если пространство между пластинами заполнить диэлектриком, его емкость увеличится.

Единица емкости. Из формулы (1) видно, что за единицу емкости нужно принять емкость такого конденсатора, у которого напряжение между обкладками равно 1 В, если заряд на каждой пластине равен 1 Кл. Называется эта единица **фарад** (сокращенно: **Ф**):

$$1 \text{ Ф} = 1 \text{ Кл/В}.$$

Фарад очень крупная единица. На практике приходится иметь дело с емкостями, которые выражаются в более мелких единицах — микрофарадах ($1 \text{ мкФ} = 10^{-6} \text{ Ф}$) и даже пикофарадах ($1 \text{ пФ} = 10^{-12} \text{ Ф}$).

■ ВОПРОСЫ

1. Что такое электроемкость? В каких единицах она выражается?
2. Имеется два конденсатора емкостями C_1 и C_2 , причем $C_1 > C_2$. Оба заряжены одинаковым зарядом q . На каком из них напряжение больше?
3. Разность потенциалов между пластинами плоского конденсатора поддерживается постоянной (конденсатор присоединен к источнику напряжения). Что изменится, если уменьшить вдвое расстояние между пластинами?

■ УПРАЖНЕНИЕ 32

1. Незаряженный плоский конденсатор емкостью 4 мкФ присоединен к источнику напряжения 12 В. Какой заряд перешел от источника на пластины?
2. Площадь пластин плоского воздушного конденсатора равна 20 см^2 , расстояние между пластинами 5 мм. Чему равна емкость конденсатора?

Чтобы зарядить конденсатор (или какое-либо другое тело), нужно отделить положительные и отрицательные заряды друг от друга. Но положительные и отрицательные заряды испытывают взаимное притяжение. Если мы хотим все же разделить заряды, мы должны затратить энергию, мерой изменения которой является работа против этих сил притяжения. Затраченная энергия не пропадает бесследно. За счет этой энергии конденсатор приобретает потенциальную энергию, равную совершенной работе.

С другой стороны, в результате зарядки конденсатора и совершенной при этом работы появляется не только заряд на конденсаторе, но и электростатическое поле в нем. Чему же приписать энергию — конденсатору или полю в нем?

Энергия заряженного конденсатора. Когда мы говорим, что конденсатор заряжен и что заряд на нем q , а напряжение U , то это не значит, что весь этот заряд появился на пластинах мгновенно. В действительности зарядка требует времени (пусть и малого) и заряд вносится постепенно, малыми порциями. Рассмотрим этот процесс.

Пусть имеется конденсатор, пока еще не заряженный. Будем заряжать его следующим образом. Снимем каким-нибудь способом некоторое число электронов с общим зарядом Δq с левой пластины и перенесем на правую¹. Обе пластины окажутся заряженными (левая — положительно), появится некоторое, пока еще малое напряжение U'_1 . Когда мы станем переносить следующую порцию электронов с зарядом Δq , нам уже придется совершить некоторую работу против сил отталкивания со стороны принесенной первой порции. Работа эта равна $\Delta q U'_1$. Эта вторая порция повысит напряжение до значения U'_2 . При переносе третьей порции заряда Δq придется опять совершить работу, теперь уже равную $\Delta q U'_2$, и т. д. Постепенно будет расти заряд на пластинах и напряжение между ними. В конце концов мы доведем заряд на пластинах до значения q_1 , а напряжение до значения U_1 .

Из формулы $q = CU$ следует, что напряжение U прямо пропорционально заряду q (рис. 161); на рисунке показан не только график OA , но и ступеньки, через которые прошел процесс зарядки. Каждая полоска соответствует одной из ступенек, переносу одной из порций заряда Δq . Площади этих полосок численно равны работам, совершенным при переносах порций заряда Δq . Из рисунка 161 видно, что полная работа при зарядке конденсатора определяется площадью фигуры под графиком, т. е. площадью треугольника OAB . Этой работе равна и энергия заряженного конденсатора:

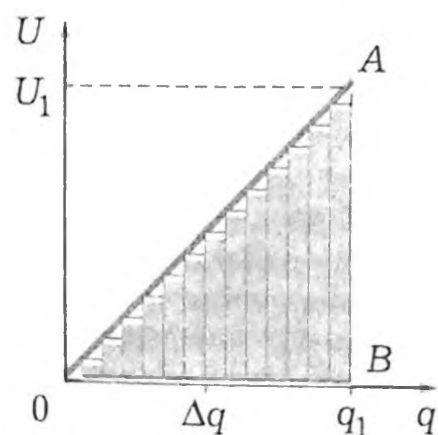


Рис. 161

$$W_{p1} = \frac{q_1 U_1}{2}. \quad (1)$$

Так как $q = CU$, то энергию $W_p = \frac{qU}{2}$ можно выразить и так:

$$W_p = \frac{CU^2}{2}. \quad (2)$$

¹ Перенос электронов будет происходить, если, например, одна из пластин покрыта слоем радиоактивного вещества, испускающего электроны.

Из определения емкости следует, что $U = \frac{q}{C}$. Поэтому для энергии W_p можно записать и такое соотношение:

$$W_p = \frac{q^2}{2C}. \quad (3)$$

Во всех трех формулах энергия выражается через величины, относящиеся к конденсатору, — заряд q на его пластинах, напряжение U между ними и емкость конденсатора C . Поэтому энергия W_p — это энергия заряженного конденсатора.

Энергия электростатического поля. Возможен, однако, и другой взгляд на энергию W_p .

В § 80 мы видели, что модуль напряженности E поля плоского конденсатора равен $E = \frac{|q|}{\epsilon_0 S}$. Отсюда $|q| = E\epsilon_0 S$. Мы знаем также, что $U = Ed$, где d — расстояние между пластинами. Подставим эти выражения для q и U в формулу (1). Тогда получим:

$$W_p = \frac{\epsilon_0 E^2 S d}{2}.$$

Но произведение площади S одной из пластин на расстояние d между ними — это объем, заключенный между пластинами, т. е. объем поля (вне конденсатора поля нет!). Обозначив объем Sd буквой V , получаем:

$$W_p = \frac{\epsilon_0 E^2}{2} V.$$

В этой формуле энергия W_p (см. формулы (1), (2), (3)) выражена через величины, относящиеся не к конденсатору, а к полю в нем, — через напряженность *поля* E . Поэтому можно сказать, что энергия W_p — это энергия поля. Как и обычные тела, поле тоже может быть носителем энергии! Чья же в действительности та энергия W_p , которая возникает за счет работы, совершенной при зарядке конденсатора, — конденсатора или поля? Пока мы имеем дело с электростатическим полем, однозначно ответить нельзя. В курсе физики XI класса будет показано, что носителем энергии следует считать поле.

■ ВОПРОСЫ

1. Почему заряженный конденсатор обладает энергией?
2. Чему равна энергия конденсатора?
3. Что представляет собой график зависимости напряжения от заряда для заряжаемого конденсатора?

■ ЗАДАНИЕ 33

1. Напряжение между пластинами плоского конденсатора поддерживается постоянным и равным 12 В. При этом заряд на его пластинах равен $6 \cdot 10^{-5}$ Кл. Чему равна энергия конденсатора? Какова его электрическая емкость? Как изменится энергия, если втрое увеличить расстояние между пластинами?
2. При разности потенциалов между пластинами плоского конденсатора 400 В заряд на пластинах равен 0,1 мКл. Вычислите площадь пластин конденсатора, его электрическую емкость и энергию, запасенную в нем, если расстояние между пластинами равно 0,4 мм.

Работа, совершаемая при перемещении заряда в электростатическом поле, не зависит от длины пути и формы траектории и определяется равенством

$$A = qEl = qU,$$

где E — модуль напряженности поля и l — проекция вектора перемещения заряда на направление вектора $\vec{E}$.

Величина, равная отношению работы, совершаемой полем при перемещении заряда из одной точки поля в другую, к заряду, называется электрическим напряжением между этими точками поля:

$$U = \frac{A}{q}.$$

Напряжение выражается в вольтах ($1 \text{ В} = 1 \text{ Дж/Кл}$).

Напряжение U_{AB} на участке AB однородного поля равно:

$$U_{AB} = El,$$

где l — проекция вектора $\overrightarrow{AB}$ на направление силовых линий поля. Напряжение измеряется электрометром.

В однородном электростатическом поле конденсатора напряжение между пластинами равно:

$$U = Ed,$$

где d — расстояние между пластинами.

Потенциальная энергия заряда в данной точке поля равна:

$$W_p = q\varphi,$$

где φ — потенциал в данной точке, т. е. напряжение между данной точкой и нулевой точкой.

Напряжение между двумя точками поля равно разности потенциалов этих точек.

Потенциал, как и напряжение, выражается в вольтах.

Так как напряженность поля внутри проводника равна нулю, потенциал во всех его точках одинаков.

Любые два изолированных друг от друга проводника образуют конденсатор. Напряжение между проводниками, образующими конденсатор, и заряд q конденсатора связаны соотношением

$$q = CU,$$

где C — емкость конденсатора. Она определяется геометрическими размерами проводников и их взаимным расположением. В случае, когда мы имеем плоский конденсатор,

$$C = \frac{\epsilon_0 S}{d},$$

где S — площадь пластин и d — расстояние между ними.

Емкость показывает, какой электрический заряд «вмещает» конденсатор при напряжении 1 В.

Емкость выражается в фарадах ($1 \text{ Ф} = 1 \text{ Кл/В}$).

Потенциальная энергия взаимодействия пластин заряженного плоского конденсатора равна:

$$W_p = q \frac{U}{2} = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C},$$

где q — заряд конденсатора, U — напряжение между пластинами, C — электрическая емкость конденсатора.

Эта же энергия может быть выражена через величины, относящиеся к полю внутри конденсатора, — напряженность поля E и объем поля V :

$$W_p = \frac{\epsilon_0 E^2}{2} V.$$

глава

17

Электростатическое поле в диэлектрике

Диэлектрик влияет на электростатическое поле

В § 71 мы рассказали об основном законе электрических взаимодействий — законе Кулона. При этом было указано, что этот закон относится к случаю, когда взаимодействующие заряды находятся в вакууме. Пользуясь законом Кулона, мы получили выражения для напряженностей электростатических полей, создаваемых различными заряженными телами. Они тоже относились к полям в вакууме. Мы выяснили также, что если в электростатическое поле помещен проводник, то под действием поля в нем происходит перераспределение заряженных частиц, в результате чего поле внутри проводника исчезает.

В этой главе мы рассмотрим случай, когда в электростатическом поле находится диэлектрик, и выясним, как поле влияет на диэлектрик и как диэлектрик влияет на поле.

§ 82 Поляризация диэлектрика

Диэлектрик нейтральный, но меняет напряжение. Начнем с простого опыта. Возьмем заряженный плоский конденсатор, пластины которого присоединены к электromетру. Стрелка электromетра отклонилась — между пластинами существует напряжение.

Поместим теперь в пространстве между обкладками конденсатора стеклянную пластинку (рис. 162). Мы увидим, что напряжение сразу уменьшится (новое положение стрелки показано пунктиром), хотя заряд на пластинах конденсатора, их площадь и расстояние между ними оста-

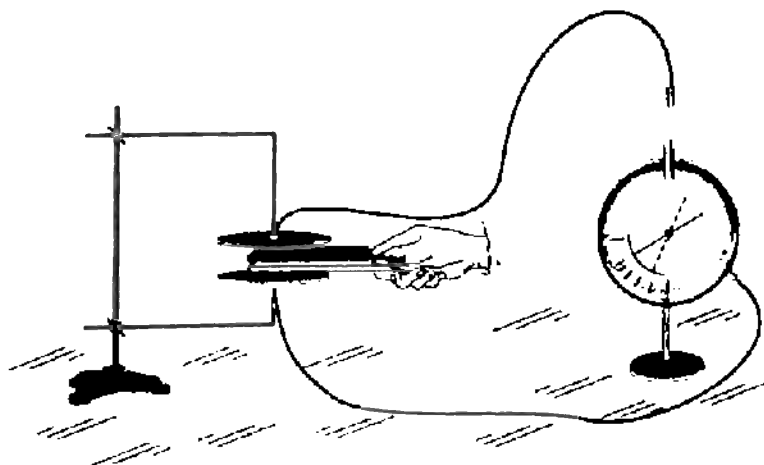


Рис. 162

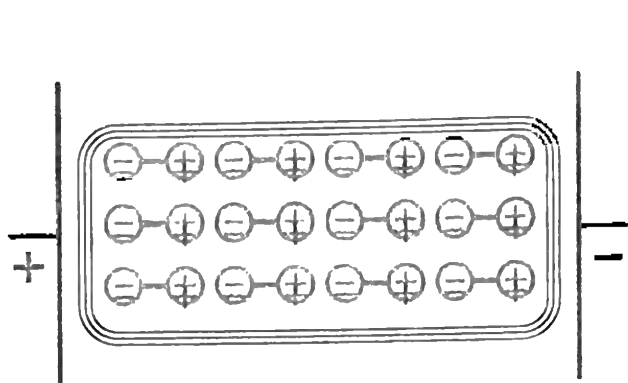


Рис. 163

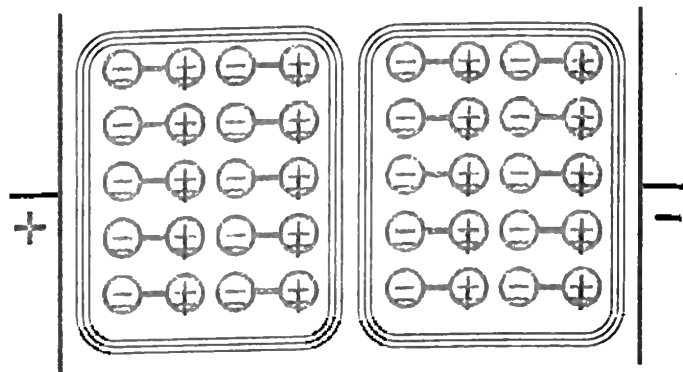


Рис. 164

лись прежними. Уменьшилась и напряженность поля в конденсаторе, которая пропорциональна напряжению. Внося в конденсатор вместо стекла другие диэлектрики, мы увидим, что любой из них хотя и по-разному, но уменьшает напряжение.

Почему это происходит?

Электростатическое поле существует в конденсаторе потому, что на его пластинах есть электрические заряды. Если при внесении диэлектрика напряженность поля уменьшается, значит, при этом появляются какие-то дополнительные заряды, помимо тех, что на пластинах. Но откуда они взялись на нейтральном незаряженном диэлектрике?

Диэлектрик поляризуется. В диэлектрике в отличие от металла нет свободных подвижных электронов. Все они прочно связаны с атомами и не отрываются от них (сами по себе!). Но внутри атомов и молекул электроны могут слегка смещаться по отношению к положительным зарядам под действием внешнего электрического поля. Тогда у молекул, которые по-прежнему остаются электрически нейтральными, появляются как бы две стороны: одна, отрицательно заряженная, обращенная к концу вектора напряженности поля, и другая, положительно заряженная, обращенная в противоположную сторону. На рисунке 163 молекулы диэлектрика в поле показаны в виде вытянутых вдоль поля фигурок (гантелек). Из рисунка видно, что каждая молекула превращается в маленький диполь и все они «выстроены» вдоль поля. Внутри диэлектрика положительный заряд одной молекулы и отрицательный ее соседа очень близки друг к другу, и они в сумме дают нулевой заряд. Но на концах куска диэлектрика, где у молекул есть соседи только с одной стороны, окажутся нескомпенсированные заряды, равные по модулю и противоположные по знаку. Это явление образования зарядов на концах диэлектрика называют *поляризацией диэлектрика*, а сами заряды, возникшие таким образом, называют *поляризационными зарядами*. Такие заряды не могут быть сняты с диэлектрика. Если, например, разделить диэлектрик на части (рис. 164), то каждая из них по-прежнему останется поляризованной. Но поляризационные заряды исчезают сами, как только прекращается действие поля на диэлектрик. Из-за того что возникшие при поляризации заряды нельзя снять, их иногда называют *связанными* зарядами.

Напряженность электростатического поля внутри диэлектрика. Теперь мы можем объяснить, почему в опыте появление диэлектрика между пластинами конденсатора (см. рис. 162) привело к уменьшению напряжения и напряженности поля. При заполнении пространства между пластинами конденсатора диэлектриком на его концах возникают поляризационные

заряды. Эти заряды сами создают собственное поле, напряженность которого направлена против поля конденсатора. Сумма же напряженностей обоих полей поэтому будет меньше напряженности первоначального поля конденсатора. Во сколько раз? Это зависит от рода диэлектрика. В стекле, например, напряженность поля уменьшается в 5 раз, в слюде — в 3 раза, а в воде — в 81 раз.

Число, показывающее, во сколько раз уменьшается напряженность поля в диэлектрике по сравнению с напряженностью поля в вакууме, называется *диэлектрической проницаемостью* диэлектрика. Ее обозначают буквой ϵ . У стекла $\epsilon = 5$, у слюды $\epsilon = 3$, у воды $\epsilon = 81$, у полиэтилена $\epsilon = 2,3$ и т. д. У воздуха $\epsilon = 1,0005$, так что поле в воздухе практически такое же, как в вакууме.

Обращаясь еще раз к опыту с конденсатором, заметим, что уменьшение напряжения в ϵ раз при том же заряде на пластинах означает, что емкость конденсатора во столько же раз увеличилась, ведь $C = \frac{q}{U}$. Емкость плоского конденсатора, например, с диэлектриком между пластинами равна не $\frac{\epsilon_0 S}{d}$, а в ϵ раз больше:

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

■ ВОПРОСЫ

1. В чем состоит явление поляризации диэлектрика?
2. Что такое диэлектрическая проницаемость?
3. Как изменяется емкость конденсатора при заполнении пространства между его обкладками диэлектриком?

§ 83 Взаимодействие зарядов в диэлектрике

Закон Кулона для зарядов в диэлектрике. Поляризация диэлектриков должна сказаться на взаимодействии зарядов, если они находятся не в пустоте, а в ~~диэлектрике~~ диэлектрике. На рисунке 165 показано некоторое заряженное тело, заряд которого $+|q_1|$, помещенное в диэлектрическую среду. Вокруг него появляются поляризационные заряды противоположного знака. И если в какой-то точке B находится другой заряд q_2 , то на него будет действовать не только q_1 , но и поляризационные заряды. Поскольку их заряд по знаку противоположен знаку заряда q_1 , то сила, действующая на заряд q_2 , будет меньше, чем если бы заряды q_1 и q_2 находились в вакууме. Заряд q_2 тоже поляризует диэлектрик. Поэтому и на заряд q_1 будет действовать сила, меньшая, чем в вакууме.

Во сколько раз? Очевидно, опять в ϵ раз. Ведь каждый из зарядов находится в поле, окружающем другой заряд, а мы уже знаем, что в диэлектрике напряженность поля уменьшается в ϵ раз. Таким образом, закон Кулона для силы взаимодействия зарядов в диэлектрике имеет вид:

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

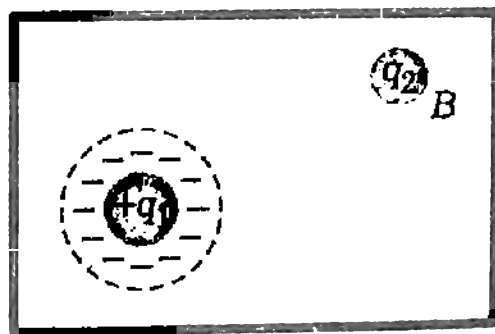


Рис. 165

Соответственно изменяются и те формулы, которые являются следствиями закона Кулона. В таблице приводятся важнейшие из полученных ранее формул для вакуума и диэлектрика.

	В вакууме	В диэлектрике
Закон Кулона	$F = k \frac{ q_1 q_2 }{r^2}$	$F = k \frac{ q_1 q_2 }{\epsilon r^2}$
Напряженность поля точечного заряда	$E = k \frac{ q }{r^2}$	$E = k \frac{ q }{\epsilon r^2}$
Поток силовых линий через замкнутую поверхность	$N = \frac{ q }{\epsilon_0}$	$N = \frac{ q }{\epsilon_0 \epsilon}$
Напряженность поля заряженной плоскости	$E = \frac{ q }{2\epsilon_0 S}$	$E = \frac{ q }{2\epsilon_0 \epsilon S}$
Напряженность поля плоского конденсатора	$E = \frac{ q }{\epsilon_0 S}$	$E = \frac{ q }{\epsilon_0 \epsilon S}$
Емкость плоского конденсатора	$C = \frac{\epsilon_0 S}{d}$	$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}$

О самом первом открытии в области электричества. Мы уже упоминали о том, что заряженные тела проявляют себя не только тем, что притягивают или отталкивают другие заряженные тела, но и тем, что притягивают к себе всевозможные легкие предметы — пылинки, кусочки бумаги и т. д., даже если все эти предметы не заряжены. Объясняется явление поляризацией этих предметов (легкими они должны быть только для того, чтобы их движениям не мешала сила тяжести). В самом деле, допустим, что вблизи заряженного тела, например стержня, находится легкий кусок диэлектрика (рис. 166). Из-за поляризации в поле заряженного стержня на ближайшем к стержню конце предмета появится противоположный по знаку поляризационный заряд, а на противоположном конце — заряд того же знака, что и на стержне. На оба эти конца будет действовать сила: на ближайший к стержню конец — сила притяжения, на дальний — сила отталкивания. Так как электростатическое поле стержня неоднородное (см. рис. 166), то эти силы неодинаковы. Из рисунка видно, что там, где находится ближний конец диэлектрика, густота силовых линий поля больше, чем у дальнего. Значит, напряженность поля у ближайшего конца больше. А так как поляризационные заряды на обоих концах одинаковые, то сила притяжения ближнего конца больше, чем сила отталкивания дальнего. Вот почему предмет и притягивается к стержню, хотя он и не заряжен.

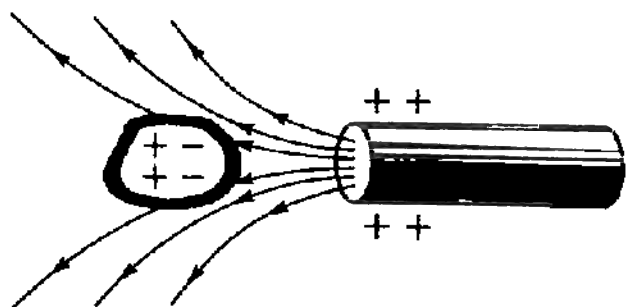


Рис. 166

Притяжение легких предметов к заряженным телам было первым обнаруженным электрическим явлением. Согласно легенде, примерно 2500 лет тому назад греческие ткачихи заметили, что легкие пылинки притягиваются к натертым пряжей деталям их ткацких станков, изготовлявшимся из янтаря.

■ ВОПРОСЫ

1. Почему ослабляется взаимодействие зарядов в диэлектрике? 2. Как влияет поляризация диэлектриков на силу взаимодействия между зарядами в диэлектрике?

■ УПРАЖНЕНИЕ 34

1. Плоский конденсатор заряжен до разности потенциалов 500 В. Затем его погрузили в жидкий аммиак, после чего разность потенциалов оказалась равной 20 В. Чему равна диэлектрическая проницаемость аммиака?

2. Пластины плоского конденсатора изолированы одна от другой диэлектриком, у которого диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 4$. Как изменится разность потенциалов, если удалить диэлектрик? До удаления диэлектрика разность потенциалов была 800 В.

Самое важное в семнадцатой главе

Электростатическое поле влияет на помещенный в него диэлектрик: диэлектрик поляризуется, на его концах появляются связанные заряды. Напряженность электрического поля этих связанных зарядов направлена против напряженности внешнего поля. В результате электростатическое поле внутри диэлектрика оказывается слабее поля тех же внешних зарядов в вакууме.

Отношение модуля напряженности электрического поля в вакууме к модулю напряженности поля внутри диэлектрика называется диэлектрической проницаемостью вещества диэлектрика. Закон Кулона для силы взаимодействия зарядов в диэлектрике имеет вид:

$$F = \frac{|q_1||q_2|}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^2} = k \frac{|q_1||q_2|}{\epsilon r^2},$$

где ϵ — диэлектрическая проницаемость диэлектрической среды.

глава

18

Постоянный электрический ток

Электрические заряды в движении

В предыдущих главах рассматривались электрические явления, в которых электрические заряды находились в покое. Но наибольший практический интерес имеют явления, связанные с движением электрических зарядов.

Упорядоченное движение электрических зарядов называется электрическим током. В этой главе речь будет идти о постоянном электрическом токе. Под постоянным электрическим током понимают такое упорядоченное движение электрических зарядов, которое не изменяется с течением времени.

Есть ряд способов создания постоянного тока. Например, некоторые радиоактивные вещества испускают отрицательно заряженные частицы — электроны и положительно заряженные α -частицы, летящие с огромной скоростью. В вакууме они могут пролетать беспрепятственно большие расстояния. Такой поток электронов или α -частиц представляет собой постоянный электрический ток.

В настоящей главе нас будет интересовать постоянный ток, проходящий через проводники и создаваемый благодаря особым устройствам — источникам тока.

§ 84

Условия существования постоянного тока. Источник тока

Напомним, что проводники — это такие тела, в которых имеются свободные носители электрических зарядов, способные перемещаться и, следовательно, ускоряться под действием приложенных к ним сил.

Для того чтобы ток через проводник был длительным, этот проводник должен быть замкнутым. В противном случае носители зарядов будут накапливаться на его концах и отталкивать следующие за ними одноименные заряды и ток прекратится.

Если бы заряды в проводнике не взаимодействовали с другими частицами, то, будучи однажды приведены в движение, они продолжали бы двигаться сколь угодно долго. Такой ток можно наблюдать в некоторых металлах при очень низких температурах, близких к абсолютному нулю. Сопротивление таких металлов — их называют сверхпроводниками — равно нулю. При обычных температурах, когда заряды в проводнике взаимодействуют с атомами или ионами, они теряют свою кинетическую энергию. Поэтому, чтобы ток был постоянным, необходимо непрерывно пополнять их энергию, т. е. совершать работу.

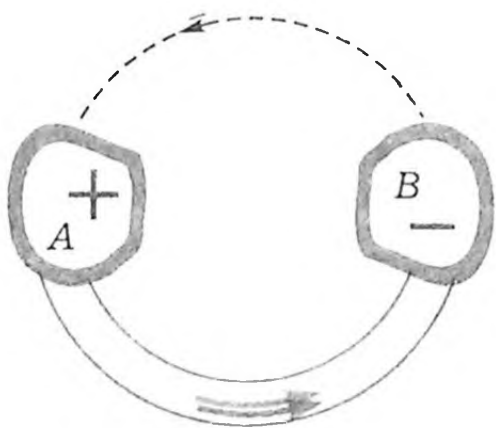


Рис. 167

Представим себе два разноименно заряженных тела A и B . Соединим эти тела проводником (рис. 167). Тогда положительный заряд под действием электрического поля будет перемещаться по проводнику в направлении, указанном стрелкой, а отрицательный заряд — в противоположном направлении¹. По проводнику пойдет ток. Перемещение зарядов будет, однако, происходить до тех пор, пока напряжение между телами не станет равным нулю. Одновременно исчезнет и электрическое поле в проводнике, которое совершало работу при перемещении зарядов. После этого ток в проводнике прекратится.

Для того чтобы ток был постоянным, необходимо, чтобы на концах проводника поддерживалось постоянное напряжение, а следовательно, в проводнике существовало неизменяющееся электрическое поле. Для этой цели необходимо особое устройство — источник тока (см. учебник физики для VIII класса).

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 , например по пути BA , как это показано пунктиром на рисунке 167. Значит, заряды на этом участке должны дви-

¹ В дальнейшем мы будем рассматривать движение только положительных зарядов, так как оно равносильно движению отрицательных зарядов в противоположную сторону.

гаться против действующих на них электростатических сил. Для этого на заряды должны действовать внешние силы, направленные противоположно электростатическим силам. Их называют сторонними силами. Источник тока и представляет собой устройство, в котором действуют сторонние силы.

Происхождение этих сил в разных источниках различно. Например, в аккумуляторе и в батарее карманного фонаря эта сила возникает благодаря химическим реакциям на границе соприкосновения пластин аккумулятора или батарейки с жидким электролитом. В фотоэлементе эти силы возникают благодаря действию света на электроны в металле или полупроводнике. В гигантских генераторах электростанций сторонние силы возникают благодаря движению проводников в магнитном поле и т. д.

§ 85 Электродвижущая сила источника

Сторонние силы. В результате действия сторонних сил электроды в источнике тока все время подзаряжаются, и поэтому между ними поддерживается постоянное напряжение. В разных источниках тока действуют различные сторонние силы, которые во время работы источника непрерывно перемещают положительные заряды между электродами от отрицательного полюса к положительному.

ЭДС источника. Чем больший заряд перемещается внутри данного источника, тем большая работа A совершается. Отношение же этой работы к переносимому заряду для данного источника остается постоянной величиной. Для других источников эта величина имеет другое значение. 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). Обозначим ее $\mathcal{E}$. Из определения ЭДС следует:

$$\mathcal{E} = \frac{A}{q},$$

где A — работа, совершаемая в источнике сторонними силами при перемещении положительного заряда q .

Из этой формулы видно, что ЭДС, как и напряжение, выражается в вольтах.

Различным образом устроенные источники отличаются своей ЭДС. Например, ЭДС гальванических элементов равна 1—2 В, свинцовых аккумуляторов 2 В, а индукционных генераторов достигает 15 000 В.

Когда к полюсам источника тока присоединяют проводник — внешний участок цепи, то в нем создается электрическое поле (рис. 168). Под действием электростатических сил ($\vec{F}_э$) положительные заряды в проводнике движутся в направлении от положительного полюса источ-

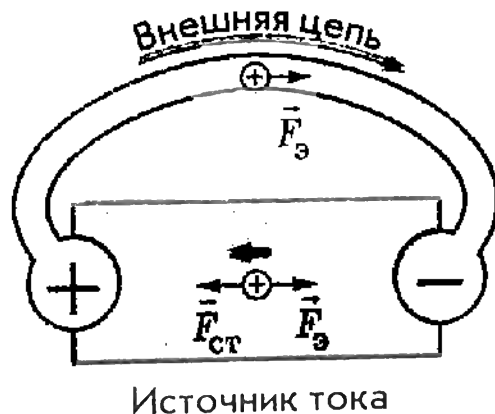


Рис. 168

ника к отрицательному. Внутри же источника благодаря действию в нем сторонних сил ($\vec{F}_{\text{ст}}$) положительные заряды перемещаются от отрицательного полюса к положительному, т. е. в сторону, противоположную электростатическим силам, которые также действуют на этом участке. В результате этого заряды движутся по замкнутому пути, создавая непрерывный ток.

Найдем работу $A_{\text{ц}}$ перемещения заряда по всей замкнутой цепи. Она складывается из работы электростатических сил на внешнем участке цепи (A_{12}) и работы на внутреннем участке. Последняя состоит из работы электростатических сил (A_{21}) и работы сторонних сил ($A_{\text{ст}}$):

$$A_{\text{ц}} = A_{12} + A_{21} + A_{\text{ст}}.$$

Первые два слагаемых представляют собой работу электростатических сил по замкнутому пути. Она, как известно, равна нулю. Следовательно,

$$A_{\text{ц}} = A_{\text{ст}}. \quad (1)$$

Таким образом, работа по 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 положительного заряда. Из равенства (1) получим:

$$\frac{A_{\text{ц}}}{q} = \frac{A_{\text{ст}}}{q} = \mathcal{E},$$

или

$$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{ц}}}{q}.$$

Следовательно, ЭДС источника равна работе, которая совершается сторонними силами при перемещении единичного положительного заряда по всей замкнутой цепи.

Механическая аналогия электрической цепи. Для того чтобы яснее представить себе роль источника тока, рассмотрим механическую модель замкнутой электрической цепи с источником тока.

По винтовой наклонной плоскости ABC (рис. 169, а) скатываются шарики. Движение электрических зарядов в проводнике под действием электрического поля аналогично движению шариков под действием силы тяжести.

Если бы на движущиеся шарики 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 плоскости по участку CA и вновь двигаться вниз. Следовательно, при отсутствии трения движение шариков было бы непрерывным.

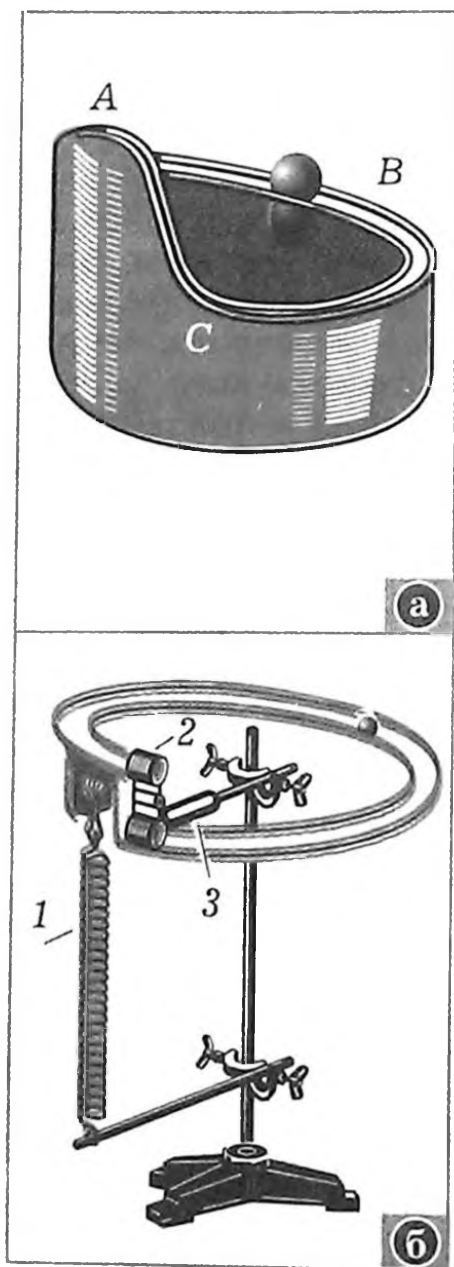


Рис. 169

Однако, двигаясь по наклонной плоскости, шарики из-за трения теряют энергию. Поэтому для непрерывного движения шариков нужно, чтобы на участке CA на них действовала какая-то сила, направленная противоположно силе тяжести, и совершала работу, поднимая их вновь к вершине плоскости.

Эту работу может совершить, например, сила упругости мышц руки, поднимающей шарики на участке CA .

Но можно к винтовой плоскости присоединить небольшой заводной подъемный механизм, действующий при помощи сил упругости пружины 1 (рис. 169, б). Поворачивающаяся часть 2 механизма удерживается защелкой 3. Каждый раз, когда шарик, скатываясь, ударяет по защелке, механизм срабатывает и поднимает шарик вновь к вершине плоскости.

Источник тока, в котором заряды перемещаются по внутренней части цепи против сил электростатического поля, выполняет ту же роль, что и подъемный механизм в этой модели.

■ ВОПРОСЫ

1. Каковы условия существования постоянного электрического тока в цепи? 2. Почему электростатические силы не могут поддерживать постоянный электрический ток в цепи? 3. Каково назначение источника электрического тока? 4. Что такое ЭДС?

§ 86 Закон Ома для полной цепи

От чего зависит сила тока в цепи? Любой из многочисленных электротехнических аппаратов или приборов рассчитан на определенную силу тока. Поэтому очень важно знать, от чего и как зависит сила тока в цепи. Ответ на этот вопрос служит основой для управления током в электрических цепях.

Из курса физики VIII класса известно, что сила тока в проводнике (резисторе) определяется по *закону Ома*:

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

Такая зависимость относится к участку цепи, на котором электрический ток создается только электростатическим полем. Такие участки цепи называются *однородными*.

Как мы выяснили, в цепи, кроме электростатических сил, могут действовать и неэлектростатические сторонние силы. Участок цепи, на котором, кроме электростатических, действуют сторонние силы, называют *неоднородным участком цепи*.

Рассмотрим схему электрической цепи (рис. 170), составленной из источника тока с электродвижущей силой $\mathcal{E}$ и реостата R , с помощью которого регулируется сила тока I в цепи. В этой цепи действуют не только электрические (кулоновские), но и сторонние силы.

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:

$$A_{\text{полн}} = A_{\text{ст}} + A_{\text{эл}}.$$

При перемещении заряда по замкнутому контуру работа кулоновских сил равна нулю: $A_{\text{эл}} = 0$, следовательно,

$$A_{\text{полн}} = A_{\text{ст}}.$$

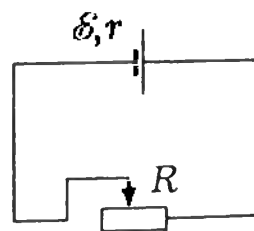


Рис. 170

Полная работа $A_{\text{полн}}$ равна сумме работ тока на внутреннем и внешнем участках цепи:

$$A_{\text{полн}} = I^2 r t + I^2 R t,$$

где r и R — электрические сопротивления внутреннего и внешнего участков цепи.

Работа сторонних сил равна: $A_{\text{ст}} = q\mathcal{E} = It\mathcal{E}$. Отсюда следует:

$$I^2 r t + I^2 R t = It\mathcal{E}, \quad \mathcal{E} = I(R + r),$$

$$\boxed{I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}} \quad (1)$$

Формула (1) выражает закон Ома для полной цепи.

Сила тока в полной цепи равна отношению электродвижущей силы источника к сумме сопротивлений внешней и внутренней частей 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.

Как измерить ЭДС? Формулу, выражающую закон Ома для полной цепи, можно записать в следующем виде:

$$\mathcal{E} = I(R + r), \quad (2)$$

или

$$\mathcal{E} = IR + Ir, \quad (3)$$

где IR — это напряжение на внешнем участке цепи (напряжение на зажимах источника), Ir — это напряжение внутри источника. Из закона Ома следует, что ЭДС источника равна сумме напряжений внутри источника и на его зажимах.

Формула закона Ома для участка цепи показывает, как можно приближенно измерить ЭДС источника.

Из закона Ома для участка цепи известно, что IR — это напряжение U на участке проводника сопротивлением R . В данном случае R — это сопротивление внешней цепи, присоединенной к полюсам источника.

$$U = IR. \quad (4)$$

Из выражений (3) и (4) следует:

$$\mathcal{E} = U + Ir, \quad U = \mathcal{E} - Ir. \quad (5)$$

Из выражений (1) и (5) получаем:

$$U = \mathcal{E} - \mathcal{E}r/(R + r) = \mathcal{E} [1 - r/(R + r)]. \quad (6)$$

Из формулы (6) видим, что чем больше сопротивление внешней цепи R по сравнению с внутренним сопротивлением r источника, тем более точный результат будет получен. Следовательно, ЭДС равняется напряжению между полюсами разомкнутого источника тока (когда сопротивление внешней цепи бесконечно велико).

Но как измерить напряжение между полюсами источника, когда цепь разомкнута? Ведь, присоединяя вольтметр к полюсам источника, мы замыкаем источник вольтметром, имеющим определенное сопротивление. Значит, чем больше будет сопротивление вольтметра по сравнению с со-

противлением источника тока, тем его показания будут ближе к истинному значению ЭДС источника.

Принципиально правильно напряжение между полюсами разомкнутого источника можно измерить с помощью электрометра (рис. 171). Его стержень и корпус, присоединяемые к полюсам источника, изолированы друг от друга. Поэтому при измерении напряжения электрометром источник остается разомкнутым.

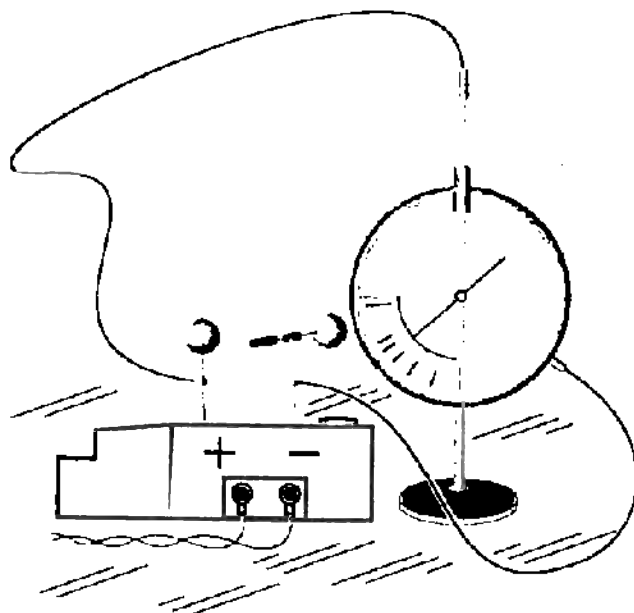


Рис. 171

Короткое замыкание. Рассмотрим, какие предельные значения силы тока можно получить в цепи, пользуясь данным источником тока. ЭДС этого источника $\mathcal{E}$ и его внутреннее сопротивление r являются для него величинами постоянными. Поэтому сила тока в цепи будет зависеть только от сопротивления внешней цепи R .

Мы уже говорили о том, что если цепь разомкнута, т. е. внешнее сопротивление велико ($R = \infty$), то сила тока равна нулю и напряжение между полюсами источника равно его ЭДС.

А каким будет ток в другом предельном случае, когда сопротивление внешней цепи уменьшается практически до нуля ($R = 0$)? Например, 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 $R = 0$, то напряжение между полюсами источника уменьшается до нуля ($U = IR$), а сила тока короткого замыкания достигает максимального значения:

$$I_{\text{к.з.}} = \frac{\mathcal{E}}{r}.$$

Как мы видим, сила тока короткого замыкания зависит не только от ЭДС источника, но и от его 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: такой ток может разрушить пластины аккумуляторов. Особенно опасны короткие замыкания в осветительных сетях, питаемых от подстанций. При значительной ЭДС (свыше 100 В) внутреннее сопротивление этих источников мало. Поэтому сила тока короткого замыкания может достигать тысяч ампер. В этом случае короткое замыкание может вызвать перегрев проводов, пожар здания и т. д. Чтобы избежать этого, в такие цепи включают предохранитель, в котором тонкий проводник AB (рис. 172) плавится при еще не слишком большой силе тока и размыкает цепь.

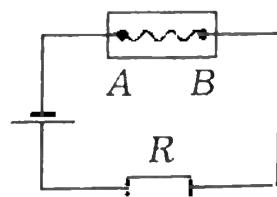


Рис. 172

■ ВОПРОСЫ

1. Как формулируется закон Ома для участка цепи? 2. Как формулируется закон Ома для полной цепи? 3. При каком условии напряжение, измеренное на полюсах источника тока, можно считать равным ЭДС источника?

■ ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

1. Определите напряжение U на полюсах источника постоянного тока с ЭДС $\mathcal{E} = 2$ В и внутренним сопротивлением $r = 2$ Ом при подключении нагрузки сопротивлением $R = 8$ Ом.

Решение.

$$U = IR, \quad I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}, \quad U = \frac{\mathcal{E}R}{R + r},$$

$$U = \frac{2\text{В} \cdot 8\text{Ом}}{8\text{Ом} + 2\text{Ом}} = 1,6 \text{ В}.$$

2. Какую ошибку в измерении ЭДС источника тока мы допускаем, если показание школьного лабораторного вольтметра, присоединенного к его полюсам, равное 4 В, принимаем за ЭДС источника тока? Внутреннее сопротивление источника тока $r = 5$ Ом, сопротивление вольтметра $R = 2000$ Ом.

Решение. Вольтметр показывает напряжение между его клеммами (т. е. на самом себе). Когда вольтметр присоединен к полюсам источника, показания вольтметра меньше ЭДС источника на значение напряжения внутри источника.

Напряжение внутри источника равно:

$$U_{\text{вн}} = Ir.$$

Силу тока можно вычислить по показанию вольтметра U и его сопротивлению R :

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

Тогда

$$U_{\text{вн}} = \frac{U}{R} r = \frac{4\text{В} \cdot 5\text{Ом}}{2000\text{Ом}} = 0,01 \text{ В}.$$

ЭДС источника тока равна:

$$\begin{aligned} \mathcal{E} &= U + U_{\text{вн}}, \\ \mathcal{E} &= 4 \text{ В} + 0,01 \text{ В} = 4,01 \text{ В}. \end{aligned}$$

Таким образом, абсолютная ошибка в измерении ЭДС составляет $\Delta\mathcal{E} = 0,01$ В, а относительная ошибка —

$$\frac{\Delta\mathcal{E}}{\mathcal{E}} = \frac{0,01\text{В}}{4\text{В}} = 0,0025, \text{ или } 0,25\%.$$

Если цена деления вольтметра равна 0,2 В, то ошибка 0,01 В не может быть обнаружена при измерениях данным вольтметром.

■ УПРАЖНЕНИЕ 35

1. ЭДС источника тока равна 4 В, к его полюсам присоединена лампочка сопротивлением 8 Ом, в результате чего в цепи установилась сила тока 0,4 А. Определите по этим данным внутреннее сопротивление источника.

2. Определите показания вольтметра и амперметра в цепи (рис. 173). 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.

3. Источник тока, имеющий ЭДС 20 В и сопротивление 0,6 Ом, создает силу тока 5 А. Каково при этом напряжение между концами внешней цепи?

4. ЭДС батареи равна 6 В, а внутреннее сопротивление 1,5 Ом. К такой батарее присоединили лампочку сопротивлением 7,5 Ом. Найдите напряжение на лампе.

5. ЭДС источника тока равна 8 В. К полюсам источника присоединили проводник сопротивлением 30 Ом. При этом напряжение между концами проводника стало равным 6 В. Чему равно внутреннее сопротивление источника?

6. Для определения ЭДС и внутреннего сопротивления источника тока к его выходу подключили переменный резистор. При одном положении движка резистора сила тока в цепи была $I_1 = 1,5$ А, напряжение $U_1 = 4,5$ В, а при другом положении движка получены значения $I_2 = 2$ А, $U_2 = 3$ В. Найдите ЭДС источника и его внутреннее сопротивление.

7. 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.

8. 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?

9. В школьном кабинете используется высоковольтный выпрямитель с ЭДС до 100 кВ. Каково минимальное значение сопротивления резистора, который должен быть включен внутри прибора для ограничения силы тока в целях безопасности, если опасной для жизни человека является сила тока 20 мА?

10. В цепи, изображенной на рисунке 174, ползунок реостата переместили так, что лампа стала светить ярче. Как изменилось при этом показание вольтметра?

11. Электрическая цепь состоит из источника тока и резистора. Во сколько раз уменьшится сила тока в цепи, если резистор сопротивлением R заменить резистором, имеющим вдвое большее сопротивление? Внутреннее сопротивление источника тока r равно R .

12. ЭДС батареи аккумуляторов равна 12 В, а ее внутреннее сопротивление — 0,04 Ом. Чему была бы равна сила тока короткого замыкания этого аккумулятора?

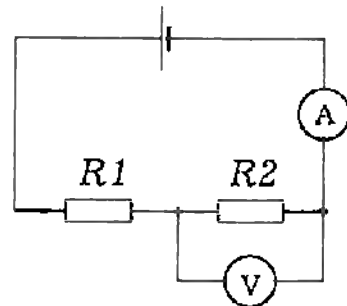


Рис. 173

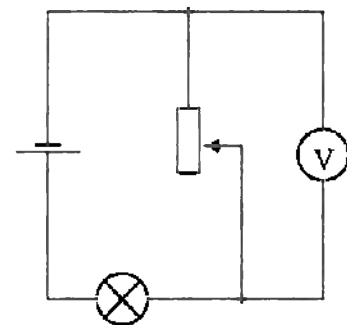


Рис. 174

§ 87 Электрические цепи

Полная электрическая цепь состоит из источника тока и внешней цепи. Во внешнюю цепь входят потребители тока (электрические лампы, нагревательные приборы, электродвигатели и т. д.), соединительные провода и выключатели. В нее могут входить также приборы, регулирующие и контролирующие силу тока и напряжение в цепи.

Сопротивление внешней цепи, от которого зависит сила тока во всей цепи (закон Ома), — это общее сопротивление всех элементов внешней цепи, соединенных между собой тем или иным способом. Но как определить сопротивление внешней цепи, зная сопротивление ее отдельных участков?

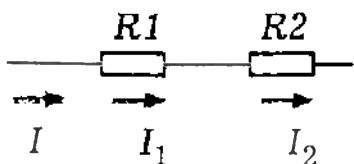


Рис. 175

Последовательное соединение. При последовательном соединении резисторов (рис. 175) сила тока во всех проводниках одинакова. И это понятно, в противном случае заряды накапливались бы в каких-то точках цепи. Следовательно,

$$I = I_1 = I_2. \quad (1)$$

Опыт также показывает, что напряжение на всей внешней цепи равно сумме напряжений на ее отдельных участках:

$$U = U_1 + U_2. \quad (2)$$

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:

$$U = IR, \quad U_1 = IR_1, \quad U_2 = IR_2.$$

Отсюда с учетом соотношения (2) следует:

$$IR = IR_1 + IR_2 = I(R_1 + R_2),$$

или

$$R = R_1 + R_2. \quad (3)$$

При последовательном соединении полное сопротивление равно сумме сопротивлений всех отдельных резисторов.

Разделив напряжение U_1 на U_2 , получим:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{IR_1}{IR_2}, \quad \frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2},$$

или

$$\frac{U_1}{R_1} = \frac{U_2}{R_2}. \quad (4)$$

Напряжения на последовательно соединенных резисторах распределяются пропорционально их сопротивлениям.

Выведенные соотношения (1) — (4) справедливы для любого числа соединенных последовательно проводников:

$$\begin{aligned} I &= I_1 = I_2 = I_3 = \dots = I_n; \\ U &= U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_n; \\ R &= R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n; \\ \frac{U_1}{R_1} &= \frac{U_2}{R_2} = \frac{U_3}{R_3} = \dots = \frac{U_n}{R_n}. \end{aligned}$$

Параллельное соединение. При параллельном соединении резисторов (рис. 176) напряжение на всех проводниках одинаково, так как они присоединены к одним и тем же точкам цепи (A и B), и равно напряжению U на всей цепи:

$$U = U_1 = U_2. \quad (5)$$

Ясно также, что

$$I = I_1 + I_2, \quad (6)$$

иначе заряды где-то скапливались бы.

Обозначим полное сопротивление всей разветвленной части цепи (между точками A и B) через R , а сопротивление каждого проводника на этом участке через R_1 и R_2 .

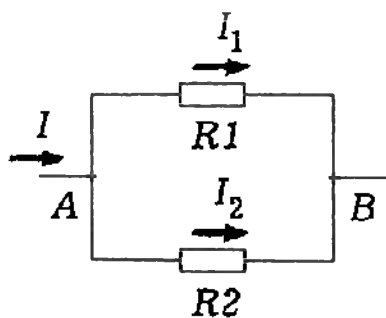


Рис. 176

Из закона Ома применительно к каждому участку цепи следует:

$$I = \frac{U}{R}, \quad I_1 = \frac{U}{R_1}, \quad I_2 = \frac{U}{R_2}.$$

Отсюда с учетом соотношения (6) получаем:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (7)$$

$$\text{и } \frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}, \text{ или } I_1 R_1 = I_2 R_2. \quad (8)$$

Величина, обратная сопротивлению всего разветвленного участка цепи, равна сумме величин, обратных сопротивлениям каждого из параллельно соединенных резисторов.

Силы токов в проводниках, соединенных параллельно, обратно пропорциональны их сопротивлениям.

Сказанное справедливо не только для двух проводников, но и для любого их числа.

$$\begin{aligned} I &= I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n; \\ U &= U_1 = U_2 = U_3 = \dots = U_n; \\ I &= \frac{U}{R}; \quad I_1 = \frac{U}{R_1}; \quad I_2 = \frac{U}{R_2}; \quad I_3 = \frac{U}{R_3}; \quad \dots; \quad I_n = \frac{U}{R_n}; \\ \frac{1}{R} &= \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n}. \end{aligned}$$

При смешанном соединении резисторов, например, таком, какое показано на рисунке 177, к участку AB применимы формулы параллельного соединения, а вся внешняя цепь представляет собой последовательное соединение участков AB и BC .

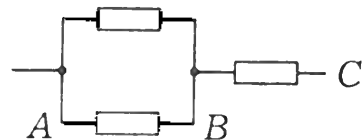


Рис. 177

Потенциометр. Каждый источник тока создает на приборе, присоединенном к его полюсам, определенное напряжение. Это напряжение может оказаться больше того, которое необходимо для нормальной работы прибора. В таких случаях возникает необходимость уменьшить напряжение, подводимое к прибору. Это можно сделать при помощи реостата, используемого в качестве «делителя» напряжения. Для этого реостат включают в цепь по следующей схеме (рис. 178): концы AB обмотки реостата присоединяют к полюсам источника тока, а прибор Π — к одному из концов обмотки реостата и к его ползунку.

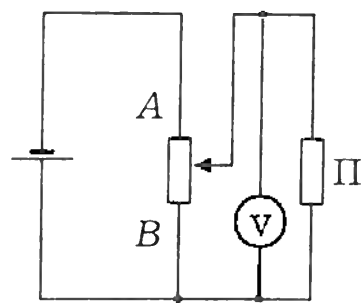


Рис. 178

При таком включении прибора к нему будет подводиться часть напряжения, которое создается источником тока на концах обмотки реостата. Когда ползунок расположен в точке A , напряжение на приборе равно напряжению на реостате (максимальное). При перемещении ползунка по направлению к точке B к прибору будет подводиться только часть напряжения между концами реостата. Когда ползунок окажется в точке B , напряжение на приборе станет равным нулю. Таким способом можно плавно изменять напряжение на приборе от некоторого максимального значения до нуля.

Реостат, включенный по такой схеме, называется *потенциометром*.

При упорядоченном движении заряженных частиц в проводнике электрическое поле совершает работу, ее принято называть *работой тока*.

Работа тока. Как известно (см. § 77), работа A , совершаемая полем при перемещении заряда q , равна $A = Uq$. Так как $q = It$, то

$$A = UIt. \quad (1)$$

Применяя закон Ома для участка цепи ($U = IR$), получаем:

$$A = I^2 R t, \quad (2)$$

где R — сопротивление проводника, в котором совершается работа.

Закон Джоуля — Ленца. Электрический ток в проводниках, имеющих сопротивление, сопровождается всегда их нагреванием, т. е. выделением некоторого количества теплоты.

Нагревание проводника происходит вследствие того, что электроны, движущиеся упорядоченно под действием электрического поля, взаимодействуют с ионами кристаллической решетки и теряют свою энергию, увеличивая амплитуду колебаний ионов. В результате энергия хаотического движения ионов около положения равновесия возрастает, что и означает увеличение внутренней энергии проводника. Постоянно действующее в проводнике электрическое поле вновь приводит электроны в ускоренное движение после их соударения с ионами. Значит, нагревание проводника происходит за счет работы электрического поля.

В случае если ток в проводнике не сопровождается механическими или химическими действиями, а происходит только нагревание проводника, то на основании закона сохранения энергии можно утверждать, что выделяющееся в проводнике количество теплоты равно работе тока:

$$Q = A = I^2 R t. \quad (3)$$

Формулу (3) на основании опытов впервые получили независимо друг от друга английский ученый Дж. Джоуль и русский ученый Э. Х. Ленц. Сформулированный ими вывод называется *закон Джоуля — Ленца*.

Количество теплоты, выделяемое проводником с током, равно произведению квадрата силы тока, сопротивлению проводника и времени прохождения тока.

Мощность тока. Любой электрический прибор (лампа, электродвигатель) рассчитан на потребление определенной энергии в единицу времени. Поэтому наряду с работой тока очень важное значение имеет понятие «мощность тока». Мощность тока равна отношению работы тока за время t к этому промежутку времени. Согласно этому определению $P = \frac{A}{t}$. Так как $A = UIt$, то

$$P = UI. \quad (4)$$

Заменяя в формуле (4) напряжение и силу тока их выражением, полученным из закона Ома ($U = IR$ и $I = \frac{U}{R}$), получаем формулы мощности тока в виде

$$P = I^2 R, \quad (5)$$

$$P = \frac{U^2}{R}. \quad (6)$$

Последними двумя формулами удобно пользоваться, когда требуется сравнивать мощности, выделяемые в проводниках, соединенных последовательно или параллельно. При последовательном соединении сила тока в проводниках одинакова. В этом случае удобно пользоваться формулой (5), из которой следует, что мощности пропорциональны сопротивлениям проводников. При параллельном соединении одинаково напряжение на проводниках, поэтому удобно пользоваться формулой (6). Из нее следует, что мощности обратно пропорциональны сопротивлениям.

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 передач 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:

$$P_1 = I^2 R, \quad (7)$$

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 (7) и заменив сопротивление проводов по формуле $R = \rho \frac{l}{S}$ (см. учебник физики для VIII класса), получаем:

$$P_1 = \frac{P^2}{U^2} R = \frac{P^2}{U^2} \rho \frac{l}{S}. \quad (8)$$

Формула (8) показывает, что мощность, которая теряется в проводах, зависит от напряжения U и площади сечения проводов (длина проводов l и передаваемая мощность P для любой линии передачи являются заданными величинами; для проводов используются медь или алюминий — материалы с наименьшим удельным сопротивлением ρ).

Возможности снижения потерь за счет увеличения площади сечения ограничены. Поэтому в основном потери уменьшают за счет повышения напряжения. В мощных линиях передач допустимыми считаются потери не более 8% ($\alpha = \frac{P_1}{P}$ меньше 0,08).

■ ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

1. К источнику тока с ЭДС $\mathcal{E} = 6$ В и внутренним сопротивлением $r = 0,5$ Ом присоединены два резистора сопротивлениями $R_1 = 2$ Ом и $R_2 = 1,5$ Ом, соединенные последовательно, и амперметр (рис. 179). а) Какую силу тока показывает амперметр? б) Каковы будут показания амперметра, если параллельно первому проводнику присоединить еще один сопротивлением $R_3 = 2$ Ом?

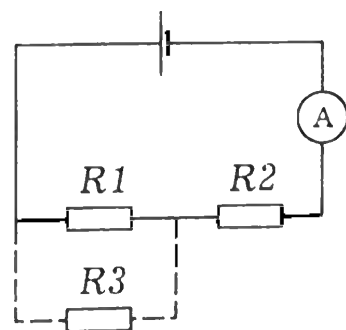


Рис. 179

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:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R_{1,2} + r},$$

откуда

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R_1 + R_2 + r} = \frac{6 \text{ В}}{2 \text{ Ом} + 1,5 \text{ Ом} + 0,5 \text{ Ом}} = 1,5 \text{ А}.$$

б) Если сопротивления параллельно соединенных проводников R_1 и R_3 обозначить через $R_{1,3}$, то все внешнее сопротивление

$$R = R_{1,3} + R_2.$$

$R_{1,3}$ находим по формуле

$$\frac{1}{R_{1,3}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3}, \quad R_{1,3} = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3}.$$

Следовательно,

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_3} + R_2.$$

Тогда

$$I = \frac{\mathcal{E}}{\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_3} + R_2 + r} = \frac{6 \text{ В}}{\frac{2 \text{ Ом} \cdot 2 \text{ Ом}}{4 \text{ Ом}} + 1,5 \text{ Ом} + 0,5 \text{ Ом}} = 2 \text{ А}.$$

2. К источнику тока с ЭДС 4 В и внутренним сопротивлением 1 Ом присоединен реостат, имеющий сопротивление 9 Ом. Чему равна сила тока в цепи, напряжение на концах внешней цепи и внутри источника в следующих случаях: а) в цепь включено все сопротивление реостата; б) ползунок реостата передвинут так, что в цепь включена только треть его сопротивления?

Решение. а) По закону Ома для полной цепи находим силу тока:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}, \quad I = \frac{4 \text{ В}}{9 \text{ Ом} + 1 \text{ Ом}} = 0,4 \text{ А}.$$

Напряжение между полюсами можно найти по закону Ома для участка цепи (внешняя часть цепи):

$$U = IR, \quad U = 0,4 \text{ А} \cdot 9 \text{ Ом} = 3,6 \text{ В}.$$

Напряжение внутри источника равно:

$$U_{\text{вн}} = Ir, \quad U_{\text{вн}} = 0,4 \text{ А} \cdot 1 \text{ Ом} = 0,4 \text{ В}.$$

$$\text{б) } I' = \frac{\mathcal{E}}{R' + r}, \quad I' = \frac{4 \text{ В}}{3 \text{ Ом} + 1 \text{ Ом}} = 1 \text{ А};$$

$$U' = I'R', \quad U' = 1 \text{ А} \cdot 3 \text{ Ом} = 3 \text{ В};$$

$$U'_{\text{вн}} = I'r, \quad U'_{\text{вн}} = 1 \text{ А} \cdot 1 \text{ Ом} = 1 \text{ В}.$$

3. Резистор сопротивлением $R_1 = 150 \text{ Ом}$ включают в сеть напряжением 220 В при помощи потенциометра. Сопротивление потенциометра равно $R_2 = 600 \text{ Ом}$. Каково будет напряжение между концами резистора, когда ползунок расположен посредине обмотки потенциометра (рис. 180)?

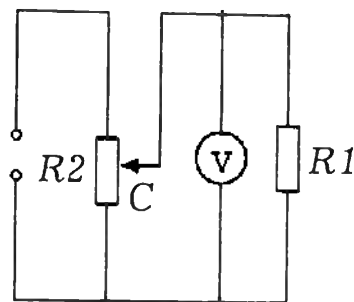


Рис. 180

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 по формуле

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3},$$

или

$$R = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3}, \quad R = \frac{150 \text{ Ом} \cdot 300 \text{ Ом}}{150 \text{ Ом} + 300 \text{ Ом}} = 100 \text{ Ом}.$$

В сеть оказываются включенными последовательно два участка сопротивлениями $\frac{R_2}{2}$ и R . Напряжения на этих участках распределяются пропорционально их сопротивлениям:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_2}{2R},$$

а сумма напряжений равна напряжению между концами цепи:

$$U_1 + U_2 = U.$$

Решая эту систему уравнений, получаем:

$$U = 55 \text{ В}.$$

4. Чему должна быть равна площадь сечения алюминиевых проводов для передачи энергии на 1000 км , если передаваемая мощность составляет $100\,000 \text{ кВт}$? Напряжение, под которым передается ток, $500\,000 \text{ В}$, а часть мощности, теряемая в проводах, $\alpha = 0,08$. Удельное сопротивление алюминия $\rho = 2,8 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Решение. Мощность, теряемая в проводах, рассчитывается по формуле $P_1 = \frac{P^2}{U^2} \rho \frac{l}{S}$, откуда $S = \frac{P^2 \rho l}{P_1 U^2}$, или $S = \frac{P \rho l}{\alpha U^2}$,

$$S = \frac{10^8 \text{ Вт} \cdot 2,8 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м} \cdot 2 \cdot 10^6 \text{ м}}{8 \cdot 10^{-2} \cdot 25 \cdot 10^{10} \text{ В}^2} = 2,8 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2, \text{ или } S = 2,8 \text{ см}^2.$$

Если бы передача велась при напряжении, например, 250 В , т. е. в 2000 раз меньшем, то площадь сечения проводов при тех же потерях была бы в $4 \cdot 10^6$ раз больше, т. е.

$$S \approx 1000 \text{ м}^2 (!).$$

Ясно, что осуществить линию передачи проводами такого сечения невозможно.

5. К источнику тока подключают два проводника (сначала первый, а затем второй) сопротивлениями R_1 и R_2 . При включении первого проводника сила

тока в цепи $I_1 = 4$ А, а мощность, выделяемая в проводнике, $P_1 = 18$ Вт. Во втором случае $I_2 = 2$ А и $P_2 = 10$ Вт. Чему равна ЭДС источника?

Решение. ЭДС источника находим из закона Ома для полной цепи. Для первого и второго случаев можно записать:

$$I_1 = \frac{\mathcal{E}}{R_1 + r} \quad \text{и} \quad I_2 = \frac{\mathcal{E}}{R_2 + r}. \quad (1)$$

Исключим из уравнений (1) внутреннее сопротивление. Для этого перепишем выражения (1) в следующем виде: $R_1 + r = \frac{\mathcal{E}}{I_1}$ и

$R_2 + r = \frac{\mathcal{E}}{I_2}$. Вычитая из второго уравнения первое, получим:

$$R_2 - R_1 = \mathcal{E} \left(\frac{1}{I_2} - \frac{1}{I_1} \right), \quad \text{или} \quad R_2 - R_1 = \mathcal{E} \frac{I_1 - I_2}{I_1 I_2}.$$

Сопротивления R_1 и R_2 можно выразить через формулы мощности: $P_1 = I_1^2 R_1$ и $P_2 = I_2^2 R_2$. Подставляя последние три равенства в формулу для ЭДС, находим:

$$\mathcal{E} = \frac{P_2 I_1^2 - P_1 I_2^2}{I_1 I_2 (I_1 - I_2)}.$$

Подставляя числовые значения данных величин, получим:

$$\mathcal{E} = 5,5 \text{ В}.$$

6. К источнику тока с ЭДС $\mathcal{E} = 60$ В и внутренним сопротивлением $r = 4$ Ом присоединен электронагревательный прибор, мощность которого $P = 200$ Вт. Чему равны сила тока в цепи, сопротивление нагревателя и напряжение на нем?

Решение. По закону Ома для полной цепи сила тока равна:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}. \quad (1)$$

Зная мощность, находим сопротивление нагревателя:

$$R = \frac{P}{I^2}. \quad (2)$$

Из выражений (1) и (2) следует:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{P/I^2 + r} = \frac{\mathcal{E} I^2}{P + I^2 r}, \quad \text{или} \quad P + I^2 r = \mathcal{E} I. \quad (3)$$

Равенство (3) представляет собой квадратное уравнение относительно силы тока: $I^2 r - \mathcal{E} I + P = 0$.

Подставив числовые значения $\mathcal{E}$ и P , получим:

$$4I^2 - 60I + 200 = 0, \quad \text{или} \quad I^2 - 15I + 50 = 0.$$

Корни этого уравнения $I_1 = 10$ А и $I_2 = 5$ А.

Соответственно из выражения (2) получим: $R_1 = 2$ Ом и $R_2 = 8$ Ом; напряжения на нагревателе по закону Ома для участка цепи равны: $U_1 = I_1 R_1 = 10 \cdot 2 = 20$ В и $U_2 = I_2 R_2 = 5 \cdot 8 = 40$ В.

Интересно, что одна и та же мощность выделяется при разных сопротивлениях нагревателя. Как это можно объяснить?

В случае когда сопротивление мало, в цепи возникает большая сила тока, но при малом сопротивлении напряжение мало. Так как мощность зависит от силы тока и напряжения $P = UI$, то

в произведении уменьшение одного из сомножителей компенсируется увеличением другого.

Проверка полученных ответов показывает, что в нашем примере так и получилось: $P_1 = 20 \cdot 10 = 200$ Вт и $P_2 = 40 \cdot 5 = 200$ Вт.

■ УПРАЖНЕНИЕ 36

1. Какую наибольшую силу тока можно получить от гальванического элемента с ЭДС 1,5 В и внутренним сопротивлением 0,5 Ом?
2. ЭДС батареи аккумуляторов 12 В, а ее внутреннее сопротивление 0,04 Ом. Чему была бы равна сила тока короткого замыкания этой батареи? Сравните полученную силу тока с силой тока, необходимой для работы лампы мощностью 55 Вт, рассчитанной на 220 В.
3. Если батарейку карманного фонаря замыкают проводником сопротивлением 17,5 Ом, то сила тока равна 0,2 А. Если же ее замкнуть проводником сопротивлением 2,3 Ом, то сила тока будет равна 1 А. Чему равны ЭДС и внутреннее сопротивление этой батарейки?
4. На рисунке 181 схематически изображена электрическая цепь. Определите показания амперметра и вольтметра для положений 1 и 2 переключателя Π . ЭДС источника 6 В, а его внутреннее сопротивление 1,5 Ом; сопротивление резистора $R = 3,5$ Ом; сопротивление амперметра и подводящих проводов ничтожно мало, а сопротивление вольтметра очень велико. Каковы будут показания приборов, если переключатель окажется на контакте 3?
5. Если двигать ползунок реостата (рис. 182) к концу B , то напряжение между его концами будет уменьшаться, а сила тока в цепи увеличиваться. Почему это происходит?
6. Найдите внутреннее сопротивление источника тока с ЭДС 2 В, если при его замыкании резистором сопротивлением 20 Ом напряжение на резисторе равно 1,6 В.
7. В розетку осветительной сети, в которой, как известно, поддерживается постоянное напряжение, включают два одинаковых проводника, соединенные один раз последовательно, а другой раз параллельно. В каком случае в проводниках выделится большая мощность?
8. 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 2 м, внутреннее сопротивление генератора 0,5 Ом; удельное сопротивление алюминия принять равным $3 \cdot 10^{-8}$ Ом · м.

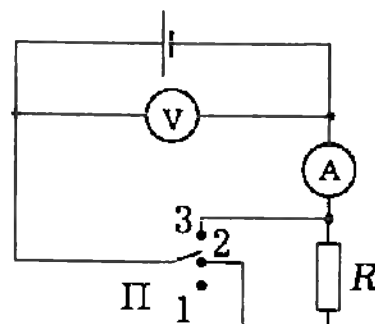


Рис. 181

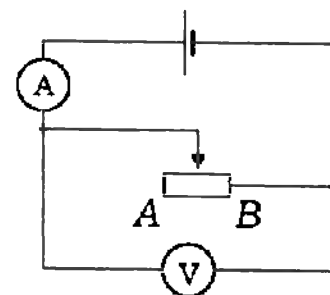


Рис. 182

§ 89 Измерение силы тока и напряжения

Измерение силы тока. Напомним, что для измерения силы тока в проводнике амперметр включают так, чтобы через него проходил весь измеряемый ток, т. е. последовательно.

Любой прибор, включенный в электрическую цепь, изменяет ток в этой цепи. Амперметр, который включают последовательно с проводником, в котором требуется измерить силу тока (рис. 183), увеличивает сопротивление цепи. Это сопротивление становится равным

$$R = R_1 + R_a, \quad (1)$$

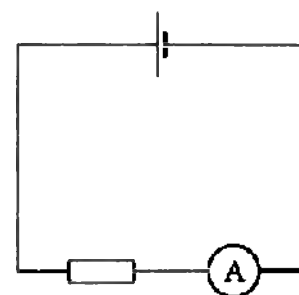


Рис. 183

где R_a — сопротивление амперметра, R_1 — сопротивление резистора. Следовательно, амперметр покажет силу тока меньшую, чем та, которая была до его включения.

Для того чтобы амперметр не менял заметно силу тока в цепи, его сопротивление, как видно из формулы (1), должно быть малым по сравнению с сопротивлением участка цепи ($R_a \ll R_1$). В этом случае R будет мало отличаться от R_1 , а следовательно, включение амперметра не будет заметно искажать силу тока в цепи. Амперметры обычно имеют сопротивления порядка десятых и сотых долей ома.

Измерение напряжения. Прибор для измерения напряжения — вольтметр изучался в курсе физики VIII класса. Напомним, что по принципу действия вольтметр не отличается от амперметра. И в том и в другом приборе рамка, состоящая из витков проволоки, поворачивается в магнитном поле при прохождении по ней тока. Угол поворота рамки пропорционален силе тока, который через нее проходит. Следовательно, вольтметр, как и амперметр, по существу, измеряет силу тока.

Каким же образом с помощью такого прибора можно измерить напряжение?

Из закона Ома для участка цепи следует, что напряжение на вольтметре пропорционально силе тока, проходящего через него. Поэтому если шкалу вольтметра проградуировать таким образом, чтобы на ней указывалась не сила тока, а величина, ей пропорциональная, — произведение силы тока на сопротивление самого вольтметра (IR_v), то прибор будет показывать напряжение на самом себе:

$$U = IR_v. \quad (2)$$

Для того чтобы узнать напряжение на интересующем нас участке цепи, например на участке AB (рис. 184), нужно вольтметр присоединить к этому участку так, чтобы напряжение на вольтметре было такое же, как и на данном участке. Для этого вольтметр нужно включать параллельно тому участку цепи, напряжение на котором измеряют.

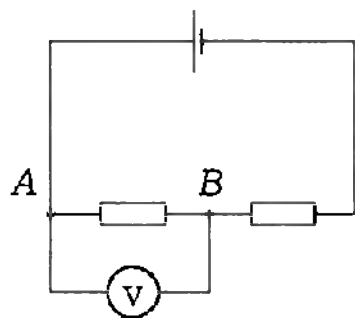


Рис. 184

А каким должно быть сопротивление вольтметра, чтобы при включении его параллельно данному участку цепи напряжение на последнем изменилось очень мало?

Рассмотрим цепь, состоящую из резисторов R_1 и R_2 , и допустим, что нужно измерить напряжение, например, на первом из них (рис. 185). Напряжение сети U можно считать постоянным.

При включении вольтметра сопротивление участка цепи, содержащего параллельно соединенные резистор R_1 и вольтметр, станет равным

$$R = \frac{R_1 R_v}{R_v + R_1}, \quad (3)$$

где R_v — сопротивление вольтметра, R_1 — сопротивление резистора R_1 .

Если сопротивление вольтметра значительно больше сопротивления проводника, на котором измеряется напряжение ($R_v \gg R_1$), то в знаменателе дроби (3)

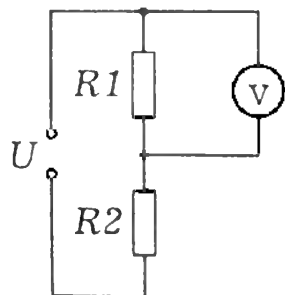


Рис. 185

сопротивлением R_1 можно пренебречь. В этом случае сопротивление R участка мало отличается от сопротивления R_1 резистора. Значит, и напряжение на этом участке останется практически таким же, каким оно было до включения вольтметра. Следовательно, в отличие от амперметра сопротивление вольтметра должно быть большим. Обычно вольтметры имеют сопротивления от нескольких сотен до десятков тысяч ом.

Каждый измерительный прибор рассчитывают на определенную максимальную для него силу тока, а значит, и на предельное для него напряжение. Но всегда оказывается возможным расширить пределы измерения данным прибором.

Шунт к амперметру. 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 значения, а остальной ток шел бы через шунт. При этом, разумеется, изменится цена деления шкалы прибора.

Поясним это примером. Амперметром, сопротивлением 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 силу тока в амперметре ($I_{\text{ц}} = nI_a$). Чему должно быть равно сопротивление $R_{\text{ш}}$ шунта III (рис. 186)?

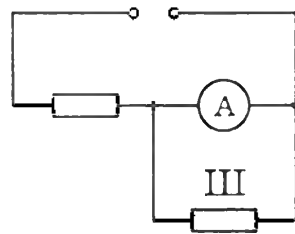


Рис. 186

Сопротивление шунта можно найти, если известны напряжение на шунте и сила тока в нем. Применяя формулы для параллельного соединения проводников, получаем:

$$I_{\text{ц}} = I_a + I_{\text{ш}}, \text{ или } I_{\text{ш}} = I_{\text{ц}} - I_a, \quad (4)$$

и

$$\frac{I_{\text{ш}}}{I_a} = \frac{R_a}{R_{\text{ш}}}. \quad (5)$$

Решая уравнения (4) и (5), найдем сопротивление шунта:

$$R_{\text{ш}} = R_a \frac{I_a}{I_{\text{ц}} - I_a}.$$

Так как $I_{\text{ц}} = nI_a$, то

$$R_{\text{ш}} = \frac{R_a}{n - 1}. \quad (6)$$

Отсюда следует, что если амперметром, рассчитанным на силу тока, например, до 1 А, нужно измерять 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. 187), чтобы вольтметром, рас-

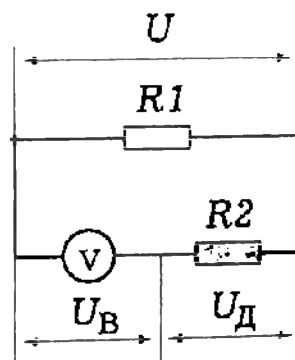


Рис. 187

считанным на максимальное напряжение U_v , можно было измерять на резисторе R_1 напряжение U , в n раз большее ($U = nU_v$).

Так как резистор R_2 соединен последовательно с вольтметром, то сумма напряжений равна измеряемому напряжению:

$$U_v + U_d = U. \quad (7)$$

Напряжения же на вольтметре и резисторе R_2 пропорциональны их сопротивлениям:

$$\frac{U_v}{U_d} = \frac{R_v}{R_d}.$$

Отсюда

$$R_d = \frac{U_d}{U_v} R_v. \quad (8)$$

Подставив в выражение (8) значение U_d из формулы (7), получим:

$$R_d = \frac{U - U_v}{U_v} R_v = \left(\frac{U}{U_v} - 1 \right) R_v,$$

и, заменив $U = nU_v$, будем иметь:

$$R_d = (n - 1) R_v.$$

Обычно в технических приборах шунты к амперметрам и дополнительные сопротивления к вольтметрам находятся внутри самих приборов.

■ ВОПРОСЫ

1. Почему сопротивление амперметра должно быть мало по сравнению с сопротивлением цепи, в которой измеряется сила тока? 2. Каким должно быть сопротивление вольтметра по сравнению с сопротивлением участка цепи, на котором измеряется напряжение? 3. Как изменяется точность измерения амперметром и вольтметром при использовании шунтов и дополнительных сопротивлений?

■ УПРАЖНЕНИЕ 37

1. Амперметром, рассчитанным на измерение силы тока до 3 А, необходимо измерять силу тока до 15 А. Сопротивление амперметра 0,1 Ом. Каким должно быть в этом случае сопротивление шунта?

2. Школьный вольтметр, рассчитанный на напряжение до 6 В, имеет сопротивление 700 Ом. Определите, какой дополнительный резистор должен быть к нему присоединен, 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 тех, которые имеются в кабинете физики (с большим удельным сопротивлением), для изготовления такого дополнительного сопротивления.

§ 90 Правила Кирхгофа

Пользуясь законом Ома, можно рассчитать силу тока на любом участке цепи. Проще всего рассчитывается сила тока в том случае, если внешняя цепь состоит из однородных участков. Такие расчеты для последовательного, параллельного и смешанного соединений проводников были рассмотрены в предыдущих параграфах.

Расчеты разветвленных цепей, содержащих неоднородные участки, значительно сложнее. В соответствии с законом Ома для неоднородного участка цепи в этих случаях требуется знание трех величин: разности потенциалов на концах этого участка, ЭДС источника тока в этом участке и

его полного сопротивления. Это сопротивление состоит из сопротивления резистора R и внутреннего сопротивления источника тока r .

Для упрощения расчета таких цепей были созданы специальные правила. Они были разработаны Г. Кирхгофом и носят его имя — правила Кирхгофа.

Первое правило Кирхгофа. Рассмотрим цепь, в некоторых точках которой (1 и 3) соединяются три проводника (рис. 188). Точки разветвленной цепи, в которых сходится не менее трех проводников, называются *узлами* цепи.

Из закона сохранения заряда следует, что суммарный ток, втекающий в узел, равен суммарному току, вытекающему из узла (рис. 189). В узлах не может происходить накопление зарядов или разрыв потока упорядоченно движущихся частиц.

Если ток втекает в узел, то силу тока считают положительной, если вытекает из узла, то силу тока считают отрицательной. Следовательно, силу тока рассматривают как величину, которая может быть положительной или отрицательной.

Первое правило Кирхгофа относится к узлам и формулируется следующим образом:

Алгебраическая сумма токов для каждого узла равна нулю:

$$I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n = 0. \quad (1)$$

В рассматриваемом случае (см. рис. 189) I_1 и I_2 — величины положительные, а I_3 , I_4 и I_5 — отрицательные.

Второе правило Кирхгофа. Оно относится к отдельным замкнутым контурам цепи и формулируется так:

Алгебраическая сумма ЭДС в контуре равна алгебраической сумме произведений сил токов и сопротивлений на каждом из участков цепи контура:

$$\mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_2 + \dots + \mathcal{E}_n = I_1 R_1 + I_2 R_2 + \dots + I_n R_n. \quad (2)$$

Легко видеть, что выражение в левой части уравнения (2) представляет собой работу источников по переносу единичного заряда вдоль всей цепи. В правой же части стоит сумма напряжений на всех участках цепи, т. е. сумма работ тока по переносу единичного заряда на этих участках. Следовательно, второе правило Кирхгофа выражает собой закон сохранения энергии.

Чтобы учесть знаки ЭДС и сил токов на каждом участке цепи, выбирают направление обхода контура. Если источник тока на этом участке со-
здает ток, совпадающий по направлению с выбранным направлением обхо-

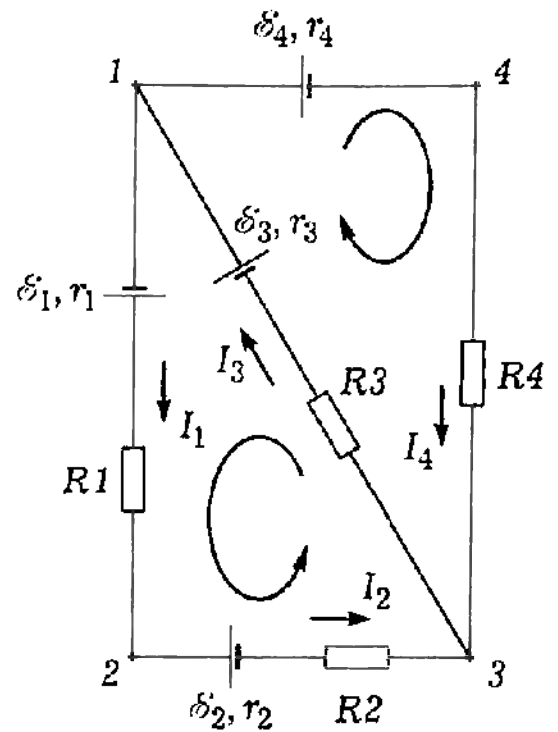


Рис. 188

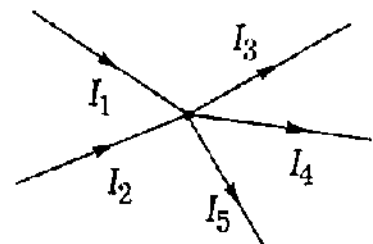


Рис. 189

да контура, то ЭДС на этом участке считается положительной, в противном случае — отрицательной. Аналогично если произвольно выбранное направление тока совпадает с направлением обхода, то силу тока считают положительной величиной, в противном случае — отрицательной.

Применение правил Кирхгофа. При использовании правил Кирхгофа надо иметь в виду следующее:

1. Число составляемых уравнений должно соответствовать числу неизвестных.

2. Составляя уравнение, надо следить, чтобы в каждое последующее входило хотя бы одно неизвестное, которое не входило 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 имеет направление, противоположное выбранному обходу контура.

Проиллюстрируем применение правил Кирхгофа для схемы электрической цепи, представленной на рисунке 188.

Применив первое правило Кирхгофа к узлу 1 и второе правило к контурам 1231 и 1431, получим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} I_3 - I_1 - I_4 = 0; \\ \mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 = I_1(R_1 + R_2 + r_1 + r_2) + I_3(R_3 + r_3); \\ \mathcal{E}_3 - \mathcal{E}_4 = I_4(R_4 + r_4) + I_3(R_3 + r_3). \end{cases}$$

Мы получили линейную систему из трех уравнений с тремя неизвестными значениями силы тока I_1 , I_3 , I_4 .

Решение этой системы при известных значениях ЭДС и внутренних сопротивлений не вызывает трудностей.

Заметим, что применять первое правило Кирхгофа для второго узла и второго правила для третьего контура нет никакого смысла, так как ничего нового мы не получим.

В общем случае число уравнений, выражающих первое правило Кирхгофа, должно быть на единицу меньше числа узлов, а число уравнений,

выражающих второе правило Кирхгофа, должно быть на единицу меньше числа контуров.

Мостик Уитстона. Правила Кирхгофа позволяют понять принцип использования так называемой мостиковой схемы (мостик Уитстона) для измерения сопротивлений. На рисунке 190 показана такая схема. Четыре резистора сопротивлениями R_1 , R_2 , R_3 , R_4 составляют «плечи» схемы. Участок цепи, содержащий гальванометр, сопротивление которого r_g , представляет собой как бы мостик, соединяющий точки B и D цепи.

Из первого правила Кирхгофа для узлов A , B и D следует:

$$\begin{aligned} I - I_1 - I_3 &= 0, & I_1 - I_5 - I_2 &= 0, \\ I_3 + I_5 - I_4 &= 0. \end{aligned}$$

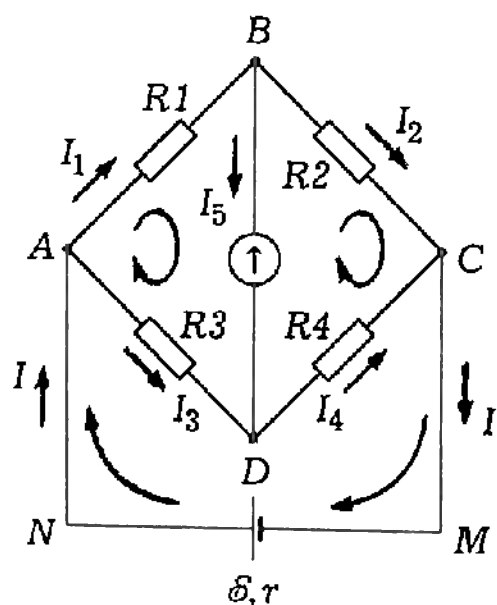


Рис. 190

Уравнение для узла C не даст ничего нового; в него войдут те же величины, которые вошли в написанные выше уравнения.

Из второго правила Кирхгофа для контуров $ABCMNA$, $ABDA$ и $BCDB$, приняв направление их обхода по часовой стрелке за положительное, получим:

$$\begin{aligned} I_1 R_1 + I_2 R_2 + I r &= \mathcal{E}; \\ I_1 R_1 + I_5 r_r - I_3 R_3 &= 0; \\ I_2 R_2 - I_4 R_4 - I_5 r_r &= 0. \end{aligned}$$

В правых частях двух последних уравнений стоит нуль, так как последние два контура не содержат источников тока.

Если известны ЭДС источника и все шесть сопротивлений участков цепи, то составленная система из шести уравнений позволяет вычислить все значения сил токов в цепи.

Система этих уравнений существенно упростится, если, изменяя сопротивления резисторов, добиться того, чтобы ток в мостике отсутствовал ($I_5 = 0$). Это можно сделать, изменяя, например, сопротивление R_3 так, чтобы разность потенциалов на участках цепи AB и AD была одинаковой. Тогда разность потенциалов между точками B и D будет равна нулю, а значит, будет равна нулю и сила тока в мостике I_5 :

$$I_5 = 0.$$

В этом случае

$$I_1 = I_2, \quad I_3 = I_4, \quad I_1 R_1 = I_3 R_3, \quad I_2 R_2 = I_4 R_4.$$

Разделив последние два уравнения одно на другое и учитывая написанные выше равенства для сил токов, получим:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}.$$

Такую мостиковую схему применяют для измерения одного из неизвестных сопротивлений, входящих в «плечи» мостика, например R_1 . Тогда

$$R_1 = R_2 \frac{R_3}{R_4}. \quad (3)$$

Мы видим, что для измерения неизвестного сопротивления R_1 достаточно знать лишь сопротивление R_2 и отношение сопротивлений $\frac{R_3}{R_4}$. Практиче-

ски в мостиках используется *реохорд* — калиброванная проволока AC (рис. 191). Подвижный контакт D осуществляет соединение гальванометра, включенного в мостик, с реохордом. Этот контакт делит реохорд на две части, сопротивления которых R_3 и R_4 пропорциональны длинам l_1 и l_2

участков реохорда: $\frac{R_3}{R_4} = \frac{l_1}{l_2}$.

Перемещением контакта по реохорду добиваются отсутствия тока в гальванометре.

Тогда выражение (3) примет вид:

$$R_1 = R_2 \frac{l_1}{l_2}. \quad (4)$$

Точность измерения неизвестного сопротивления с помощью мостика определяется только

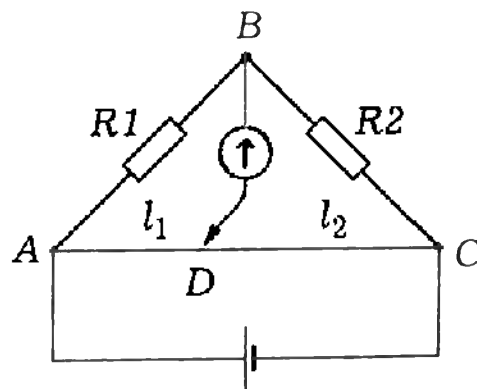


Рис. 191

точностью измерения длин отрезков реохорда. Поэтому такой способ более точен, чем измерение сопротивления резистора путем измерения силы тока и напряжения.

■ ВОПРОСЫ

1. Следствием чего является первое правило Кирхгофа? второе правило Кирхгофа?
2. Какие требования учитываются при применении правил Кирхгофа? 3. Каков принцип измерения сопротивлений с помощью мостика Уитстона?

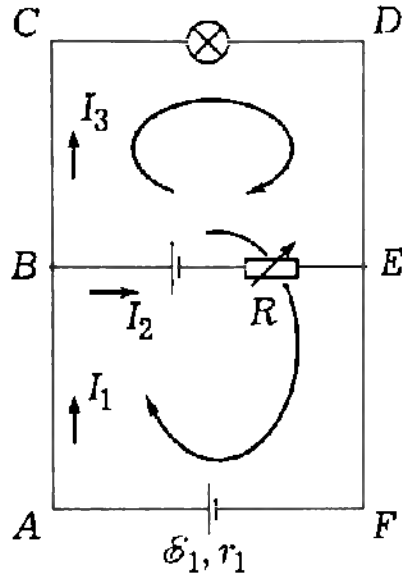


Рис. 192

■ ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

На рисунке 192 показана схема цепи, собранной для зарядки аккумулятора. Она состоит из источника тока с ЭДС $\mathcal{E}_1 = 12$ В и внутренним сопротивлением $r_1 = 0,2$ Ом и осветительной лампы сопротивлением $R_1 = 3$ Ом. ЭДС заряженного аккумулятора $\mathcal{E}_2 = 10$ В, его внутреннее сопротивление $r_2 = 0,2$ Ом, а сопротивление включенной части реостата $R = 0,4$ Ом. Рассчитайте силы токов во всех участках цепи.

Решение. Выбранные направления обхода контуров и направления токов в узлах показаны на рисунке.

Из первого правила Кирхгофа в применении к узлу B следует:

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0. \quad (1)$$

Для узла E уравнение не даст ничего нового, так как в него войдут те же значения сил токов. Применив к контурам BCDEB и ACDF A второе правило Кирхгофа, получим следующие уравнения:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_2 &= I_3 R_1 - I_2 R - I_2 r_2, \\ \mathcal{E}_1 &= I_3 R_1 + I_1 r_1, \end{aligned}$$

или, обозначив $(R + r_2)$ через R_2 , запишем:

$$\mathcal{E}_2 = I_3 R_1 - I_2 R_2, \quad (2)$$

$$\mathcal{E}_1 = I_3 R_1 + I_1 r_1. \quad (3)$$

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.

Исключив значение силы тока I_1 из уравнения (3), получим:

$$\mathcal{E}_1 = I_3 R_1 + (I_2 + I_3) r_1 = I_3 R_1 + I_2 r_1 + I_3 r_1,$$

или

$$\mathcal{E}_1 = I_3 (R_1 + r_1) + I_2 r_1.$$

Уравнения (2) и (3) позволяют найти силы токов I_2 и I_3 .

Умножим все величины, входящие в уравнение (2), на r_1 , а уравнение (3) на r_2 и сложим полученные при этом уравнения, тогда будем иметь:

$$\mathcal{E}_1 R_2 + \mathcal{E}_2 r_1 = I_3 [(R_1 + r_1) R_2 + R_1 r_1].$$

Отсюда

$$I_3 = \frac{\mathcal{E}_1 R_2 + \mathcal{E}_2 r_1}{(R_1 + r_1) R_2 + R_1 r_1} = \frac{\mathcal{E}_1 R_2 + \mathcal{E}_2 r_1}{R_1 (r_1 + R_2) + r_1 R_2}.$$

Аналогично, исключив из уравнений (2) и (3) силу тока I_3 , получим для I_2 следующее выражение:

$$I_2 = \frac{(\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2)R_1 - \mathcal{E}_2 r_1}{R_1(r_1 + R_2) + r_1 R_2}.$$

Из уравнения (1) следует:

$$I_1 = I_2 + I_3.$$

Подставив в это уравнение найденные значения I_2 и I_3 , получим:

$$I_1 = \frac{(\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2) + \mathcal{E}_1 R_2}{R_1(r_1 + R_2) + r_1 R_2}.$$

Подставив данные из условия задачи, найдем численные значения искомых величин:

$$I_2 \approx 1,6 \text{ А}, \quad I_3 \approx 3,6 \text{ А}, \quad I_1 \approx 5,2 \text{ А}.$$

■ УПРАЖНЕНИЕ 38

1. Два источника тока с ЭДС $\mathcal{E}_1$ и $\mathcal{E}_2$ включены так, как показано на рисунке 193. При каком соотношении между внутренними сопротивлениями r_1 и r_2 источников сила тока через гальванометр будет равна нулю? Сопротивление гальванометра считать равным нулю.

2. 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 194. Найдите силы токов через источники и силу тока через перемычку AB , сопротивление которой принять равным нулю.

3. Два элемента, ЭДС которых одинаковы и равны $\mathcal{E} = 2 \text{ В}$, соединены параллельно и замкнуты на резистор R (рис. 195). Внутренние сопротивления элементов равны соответственно $r_1 = 1 \text{ Ом}$ и $r_2 = 2 \text{ Ом}$. Чему равно сопротивление резистора R , если сила тока в первом элементе $I_1 = 1 \text{ А}$? Найдите силы токов во втором элементе и резисторе.

4. Два источника тока, ЭДС и внутренние сопротивления каждого из которых соответственно равны $\mathcal{E}_1 = 1,6 \text{ В}$, $r_1 = 1 \text{ Ом}$ и $\mathcal{E}_2 = 1,3 \text{ В}$, $r_2 = 0,5 \text{ Ом}$, соединены так, как показано на рисунке 196. Определите силы токов во всех ветвях, если резистор имеет сопротивление $R = 0,6 \text{ Ом}$.

5. 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 197. Определите силу тока в проводнике, электрическое сопротивление которого R .

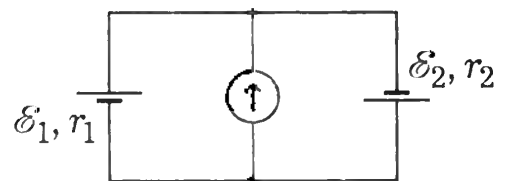


Рис. 193

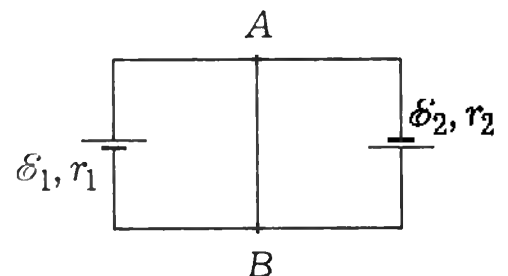


Рис. 194

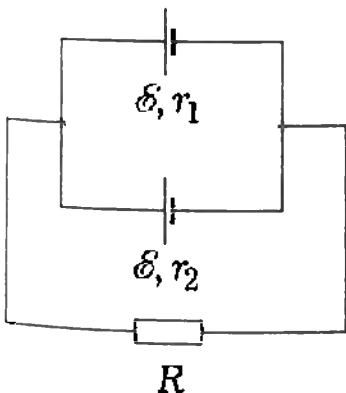


Рис. 195

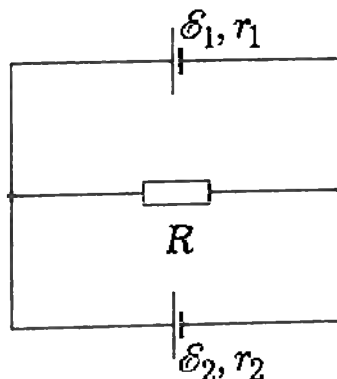


Рис. 196

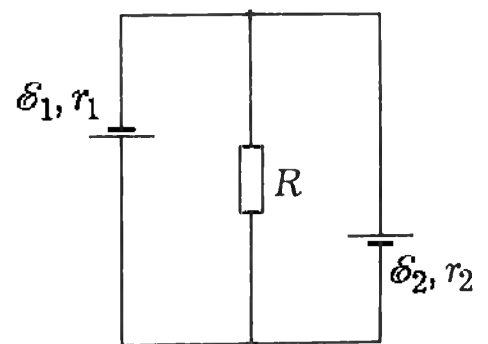


Рис. 197

Гальванические элементы и аккумуляторы, которыми пользуются для создания тока в различных устройствах (в карманных фонарях, автомашинах, полевых телефонах и др.), имеют малую ЭДС. Обычно она не превышает 2 В. Поэтому для создания в указанных устройствах необходимой силы тока эти источники тока (элементы) различными способами — последовательно или параллельно — соединяют между собой в батарее. Рассмотрим эти способы.

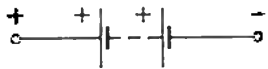


Рис. 198

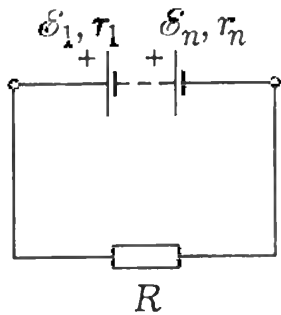


Рис. 199

Последовательное соединение. При последовательном соединении элементов отрицательный полюс каждого элемента соединяют с положительным полюсом следующего за ним (рис. 198). Внешняя цепь соединяется с положительным полюсом первого элемента и с отрицательным — последнего, которые в этом случае представляют собой полюсы батареи.

Например, батарея карманного фонаря состоит из трех последовательно соединенных элементов.

Применив второе правило Кирхгофа к цепи (рис. 199), можно найти ЭДС и внутреннее сопротивление полученной батареи:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \dots + \mathcal{E}_n &= \\ = IR + Ir_1 + Ir_2 + Ir_3 + \dots + Ir_n, \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \dots + \mathcal{E}_n &= \\ = I(R + r_1 + r_2 + r_3 + \dots + r_n). \end{aligned}$$

Отсюда

$$I = \frac{\mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \dots + \mathcal{E}_n}{R + r_1 + r_2 + \dots + r_n}. \quad (1)$$

Сравнение полученного выражения с законом Ома для полной цепи $\left(I = \frac{\mathcal{E}}{R + r} \right)$ показывает, что ЭДС батареи равна $\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \dots + \mathcal{E}_n$, а ее внутреннее сопротивление равно $r = r_1 + r_2 + \dots + r_n$.

Обычно соединяют между собой источники тока с одинаковыми ЭДС и внутренними сопротивлениями. В этом случае ЭДС батареи равна $\mathcal{E}_6 = n\mathcal{E}$, где n — число последовательно соединенных элементов, а внутреннее сопротивление батареи $r_6 = nr$. С учетом этого формула (1) принимает вид:

$$I = \frac{n\mathcal{E}}{R + nr}. \quad (2)$$

Параллельное соединение. При параллельном соединении элементов все их положительные полюсы соединяют в один узел, который служит положительным полюсом батареи. В другой узел — отрицательный полюс батареи — соединяют все отрицательные полюсы элементов (рис. 200).

Параллельно соединять элементы целесообразно при условии, что они имеют одинаковые ЭДС. В противном случае внутри батареи (рис. 201) в контуре $ABCD$ будет циркулировать ток. Рассчитаем его. Применим второе правило Кирхгофа к этому контуру. Пусть $\mathcal{E}_1 > \mathcal{E}_2$, тогда $\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2 = Ir_1 + Ir_2$, откуда

$$I = \frac{\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2}{r_1 + r_2}. \quad (3)$$

Этот ток приводит к расходованию энергии батареи, даже когда ею не пользуются для создания тока в потребителе.

Если же ЭДС элементов равны ($\mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_2$), то из формулы (3) видно, что ток внутри отсутствует и ее энергия не будет бесполезно расходоваться.

Правила Кирхгофа позволяют определить ЭДС и внутреннее сопротивление батареи при параллельном соединении элементов.

Первое правило Кирхгофа для узла А (рис. 202) дает:

$$I = i_1 + i_2 + \dots + i_n.$$

Так как мы рассматриваем только случай соединения одинаковых элементов, то силы токов во всех ветвях также одинаковы:

$$i_1 = i_2 = i_3 = \dots = i_n.$$

Тогда из равенства (4) следует:

$$I = ni, \text{ или } i = \frac{I}{n}. \quad (5)$$

Применяя второе правило Кирхгофа к контуру $AMNBDA$ (направление обхода указано на рисунке стрелкой), получим:

$$\mathcal{E} = IR + ir. \quad (6)$$

Подставив выражение для i из формулы (5) в формулу (6), видим, что $\mathcal{E} = IR + \frac{I}{n}r$, или $\mathcal{E} = I \left(R + \frac{r}{n} \right)$.

Преобразуем полученное выражение в следующем виде:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + \frac{r}{n}}. \quad (7)$$

Сопоставление этого выражения с законом Ома для полной цепи показывает, что ЭДС батареи равна ЭДС одного элемента, а сопротивление батареи в n раз меньше сопротивления одного элемента.

При каком из рассмотренных соединений в цепи потребителя получается наибольшая сила тока? Для ответа на поставленный вопрос преобразуем вы-

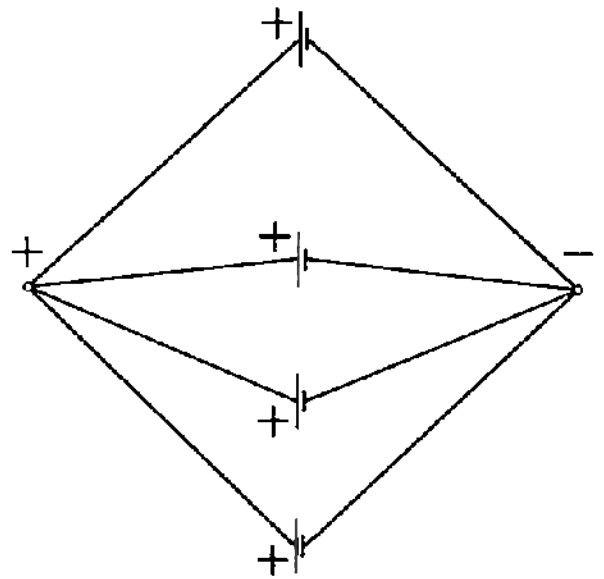


Рис. 200

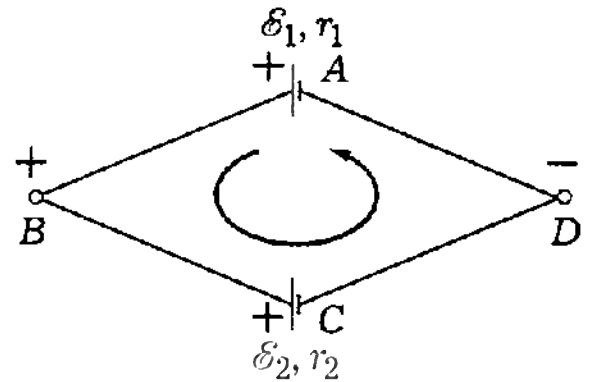


Рис. 201

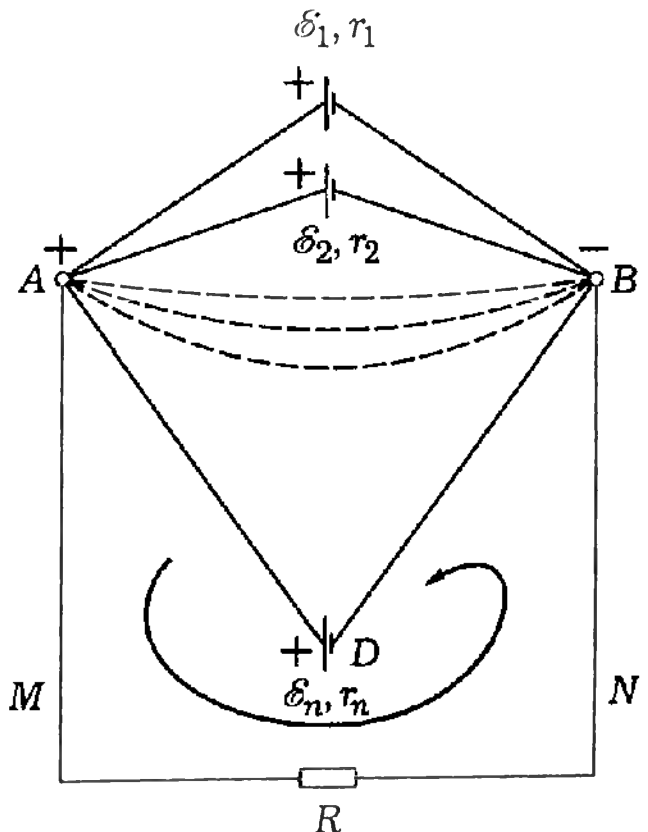


Рис. 202

ражение (2), разделив числитель и знаменатель его правой части на число элементов n :

$$I = \frac{\mathcal{E}}{\frac{R}{n} + r}. \quad (8)$$

Теперь сравним выражения:

$$I_{\text{ис}} = \frac{\mathcal{E}}{\frac{R}{n} + r} \quad \text{и} \quad I_{\text{пр}} = \frac{\mathcal{E}}{R + \frac{r}{n}}.$$

Из сравнения видно, что при $R > r$ выгодно последовательное соединение элементов в батарею, так как при одинаковых числителях дроби в n раз уменьшается большее слагаемое знаменателя. Если же $r > R$, то по этой же причине выгодно параллельное соединение.

■ УПРАЖНЕНИЕ 39

1. Батарея состоит из 8 аккумуляторов, соединенных последовательно. ЭДС каждого аккумулятора $\mathcal{E} = 2$ В, его внутреннее сопротивление $r = 0,2$ Ом. Внешняя цепь образована двумя параллельно соединенными резисторами, сопротивления которых равны $R_1 = 4$ Ом и $R_2 = 6$ Ом. Определите напряжение на зажимах батареи и силу тока во втором резисторе.

2. Четыре элемента с ЭДС 1,5 В и внутренним сопротивлением 0,4 Ом соединены параллельно. К образованной батарее присоединили два резистора, соединенные между собой последовательно. Сопротивления резисторов равны соответственно $R_1 = 0,9$ Ом и $R_2 = 2$ Ом. Найдите напряжение на первом резисторе и мощность, выделяющуюся во втором резисторе.

Самое важное в восемнадцатой главе

Электрический ток представляет собой упорядоченное перемещение электрических зарядов: положительных — в одну сторону, отрицательных — в противоположную. Благодаря взаимодействию с атомами и ионами проводника движущиеся электрические заряды теряют кинетическую энергию. Поэтому для поддержания тока необходим источник тока. Его полюсы (электроды) заряжаются благодаря работе сторонних сил внутри источника до некоторой разности потенциалов.

Каждый источник характеризуется его электродвижущей силой (ЭДС) и внутренним сопротивлением. Электродвижущей силой называется отношение работы сторонних сил к значению положительного заряда, переносимого от отрицательного полюса источника к положительному.

Так как работа электростатических сил по замкнутому пути равна нулю, то только работа сторонних сил компенсирует потери энергии носителями заряда при их движении по всей замкнутой цепи. Поэтому ЭДС источника численно равна работе, которая совершается сторонними силами при перемещении единичного положительного заряда по всей цепи.

ЭДС источника может быть измерена по разности потенциалов между полюсами разомкнутого источника.

Напряжение на неоднородном участке цепи равно работе всех сил (электростатических и сторонних) по переносу единичного заряда на данном участке цепи:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}.$$

Закон Ома для такого участка выражается формулой

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}}{R}.$$

Сила тока в цепи, состоящей из источника тока с ЭДС $\mathcal{E}$ и внутренним сопротивлением r и нагрузки сопротивлением R , определяется по закону Ома для полной цепи:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}.$$

При последовательном соединении проводников сила тока одинакова во всей цепи. Полное сопротивление равно:

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n.$$

Напряжения на проводниках связаны с сопротивлениями этих проводников соотношением

$$\frac{U_1}{R_1} = \frac{U_2}{R_2} = \frac{U_3}{R_3} = \dots = \frac{U_n}{R_n}.$$

При параллельном соединении проводников напряжение на всех проводниках одинаково:

$$U = U_1 = U_2 = \dots = U_n.$$

Сила тока в неразветвленной части цепи равна сумме сил токов в ветвях:

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n.$$

Величина, обратная сопротивлению всего разветвленного участка цепи, равна сумме величин, обратных сопротивлениям каждого из параллельно соединенных резисторов:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} = \frac{1}{R_2} = \dots = \frac{1}{R_n}.$$

Для расчета сложных цепей удобно пользоваться правилами Кирхгофа.

Первое правило Кирхгофа относится к узлам, в которых сходятся отдельные ветви цепи. Алгебраическая сумма сил токов для узла равна нулю:

$$I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n = 0.$$

Второе правило Кирхгофа применяется к отдельным замкнутым контурам цепи. Алгебраическая сумма ЭДС в контуре равна алгебраической сумме произведений сил токов и сопротивлений на каждом из участков цепи контура:

$$\mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \dots + \mathcal{E}_n = I_1 R_1 + I_2 R_2 + \dots + I_n R_n.$$

Источники тока соединяют в батареи различными способами. При последовательном соединении элементов ЭДС батареи равна $\mathcal{E}_6 = n\mathcal{E}$ (здесь n — число элементов, $\mathcal{E}$ — ЭДС одного элемента), а

внутреннее сопротивление батареи равно $r_6 = nr$. В этом случае сила тока в полной цепи определяется выражением

$$I = \frac{\mathcal{E}n}{R + rn}.$$

При параллельном соединении элементов в батарею ее ЭДС равна ЭДС одного элемента ($\mathcal{E}_6 = \mathcal{E}$), а внутреннее сопротивление батареи равно $r_6 = \frac{r}{n}$. При таком соединении источников сила тока в цепи определяется формулой

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + \frac{r}{n}}.$$

глава 19 Магнитное поле электрического тока

Если электрические заряды движутся

В 1820 г. было сделано одно из важнейших открытий в истории физики. Было установлено, что когда электрические заряды движутся (как, например, движутся электроны в металле, когда по нему идет ток), то, кроме известных нам электростатических сил, между движущимися зарядами действуют еще и другие силы, совсем на них непохожие. Называются они *магнитными* силами. Такое название объясняется тем, что известные еще с древних времен силы, действующие между *магнитами*, как оказалось, связаны с тем, что частицы в них ведут себя как электрические токи.

Магнитные силы, как и электростатические, действуют через посредство поля, но поля магнитного.

Магнитные силы привлекли к себе большое внимание, тем большее, что вскоре выяснилась возможность их широкого практического использования. Современная электротехника, радиотехника, миллионы всевозможных устройств и приборов основаны на использовании этих сил.

В этой главе мы познакомимся с магнитными силами, магнитным полем и с явлениями, которые с ними связаны.

§ 92 Взаимодействие токов в вакууме¹

Рассмотрим опыты, которые показывают, как взаимодействуют токи².

Если через два параллельных гибких проводника пропускать токи одного направления (рис. 203), то они взаимно притягиваются. Если направления токов в проводниках противоположны друг другу, то проводники отталкиваются (рис. 204).

¹ Воздух практически не влияет на силу взаимодействия токов.

² Словом «ток» для краткости мы заменяем фразу «проводник, по которому течет электрический ток».

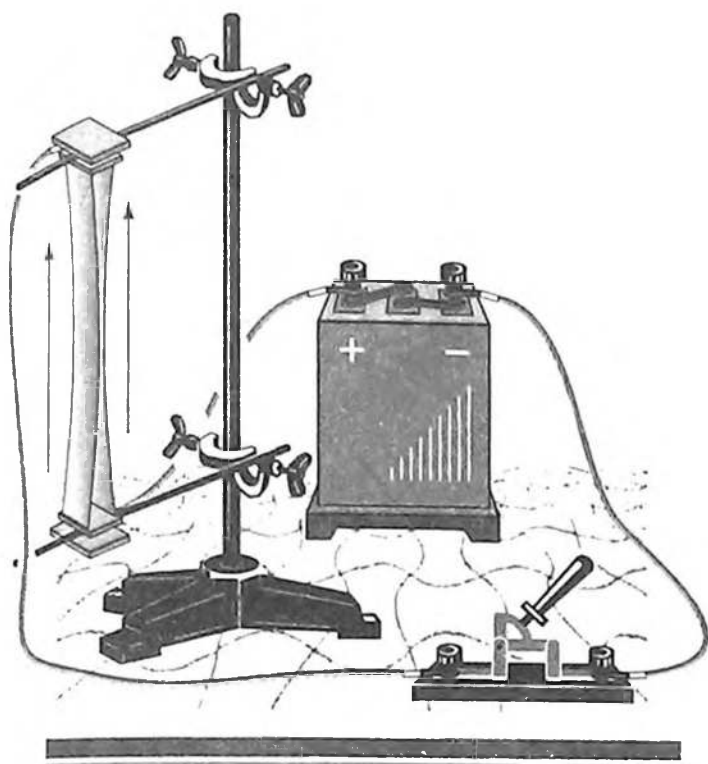


Рис. 203

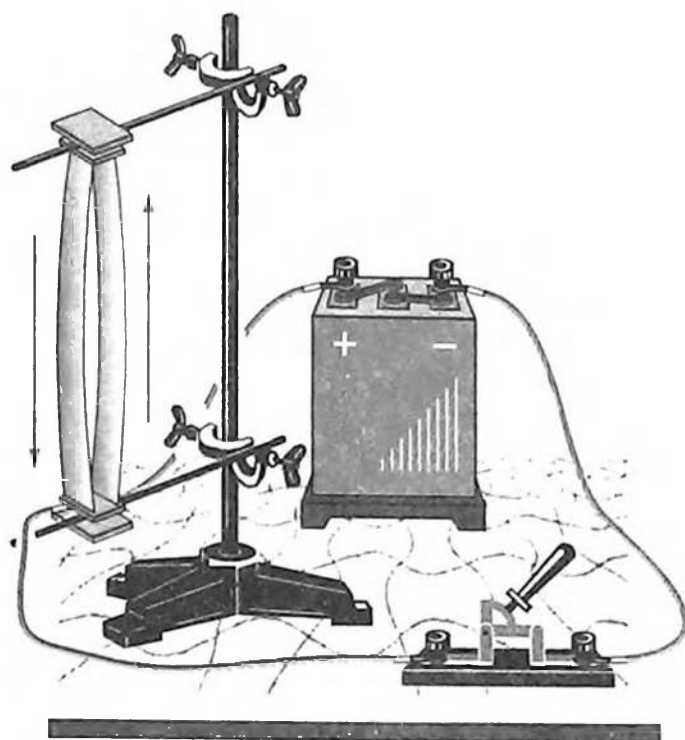


Рис. 204

Взаимодействуют между собой, притягиваясь или отталкиваясь, не только прямолинейные токи, но и токи в проводниках любой формы. Например, свободно подвешенные витки из проволоки притягиваются, если токи в них одного направления (рис. 205), и отталкиваются, если токи в витках противоположно направлены.

Взаимодействуют и катушки с токами. Пусть, например, одна из катушек закреплена, а другая свободно подвешена. Когда через катушки пропускают ток, подвижная катушка поворачивается так, чтобы направления токов в обеих катушках были одинаковыми, после чего подвижная катушка притягивается к неподвижной и надевается на нее (рис. 206). Если по-

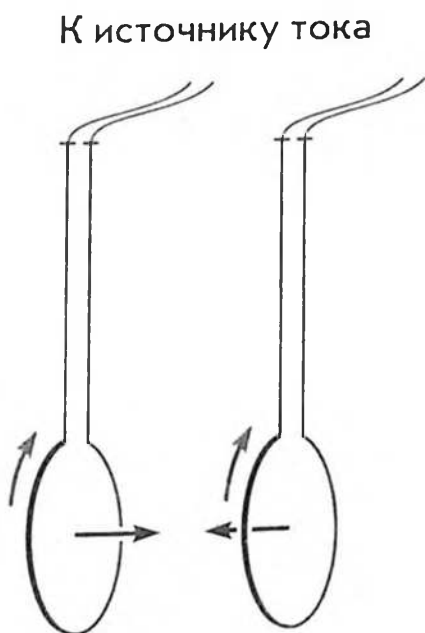


Рис. 205

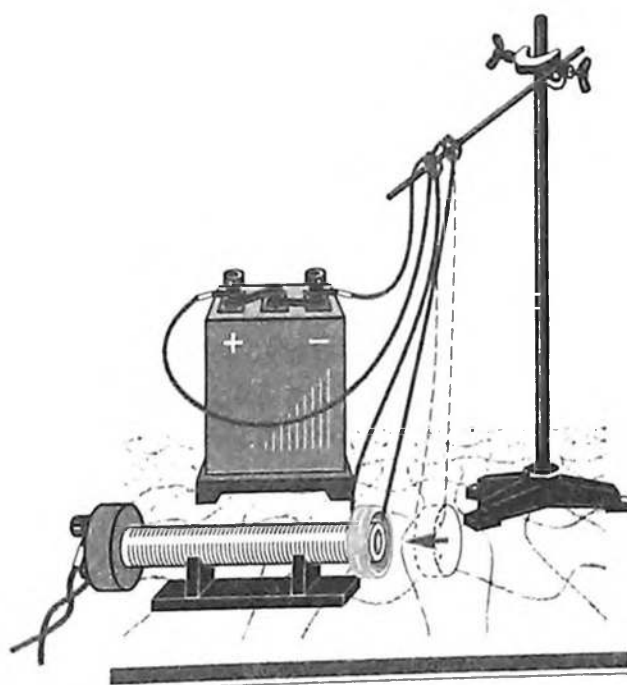


Рис. 206

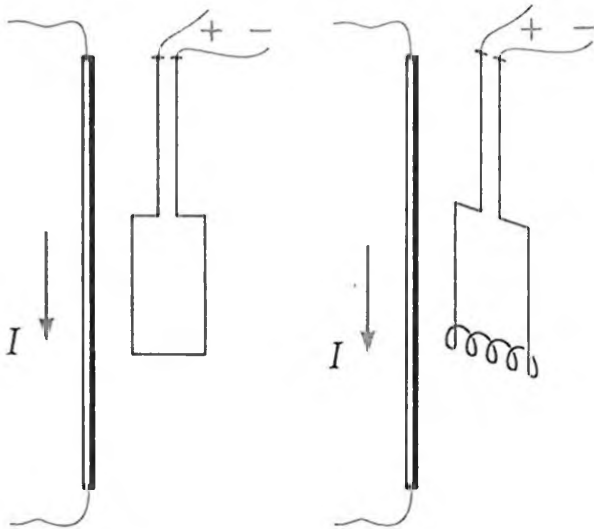


Рис. 207

Рис. 208

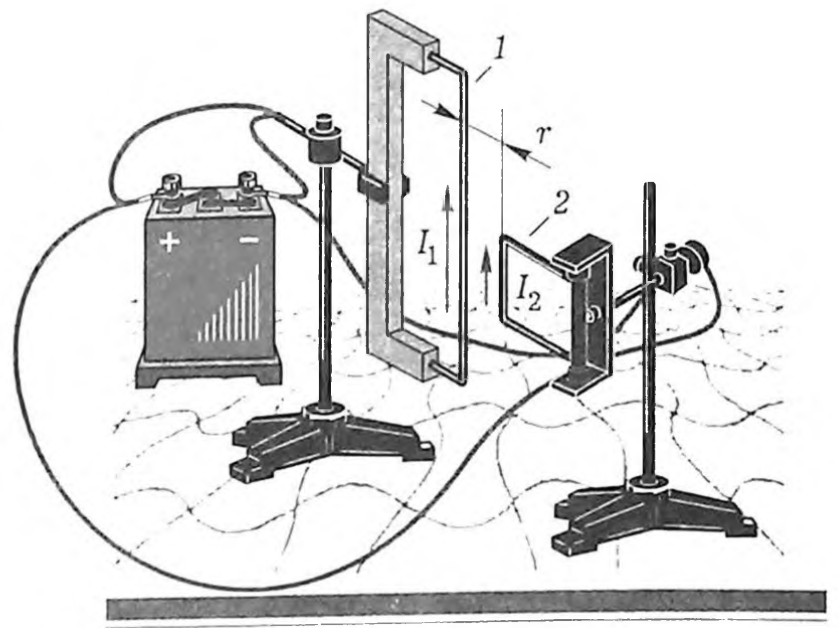


Рис. 209

вороту подвижной катушки воспрепятствовать, а направления токов в обеих катушках противоположны, подвижная катушка оттолкнется от неподвижной.

Взаимодействия токов не всегда сводятся к притяжениям или отталкиваниям. Если, например, свободно подвешенную маленькую рамку с током поместить вблизи прямолинейного проводника с током, то она не станет ни притягиваться к проводнику, ни отталкиваться от него, а только повернется и расположится так, чтобы оказаться с проводником в одной плоскости (рис. 207). Не будет притягиваться к прямолинейному проводнику и маленькая катушка. Она тоже повернется и расположится так, что ее ось будет перпендикулярна проводнику (рис. 208).

Элемент тока. Чтобы разобраться в этих взаимодействиях токов — притяжениях, отталкиваниях и поворотах, удобно рассмотреть не весь проводник с током, на который действует магнитная сила, а малый участок проводника — участок малой длины Δl . Ведь любой проводник составлен из таких участков, подобно тому как любое заряженное тело мы представляем себе состоящим из точечных зарядов. Сила, действующая на весь проводник, складывается из сил, действующих на все малые его участки.

Назовем такой малый участок *элементом тока*, а количественно будем описывать его величиной, равной произведению силы тока I в элементе на его длину, т. е. величиной $I\Delta l$, которую также называют элементом тока.

Мы рассмотрим здесь взаимодействие элемента тока с прямолинейным проводником с током. Наблюдать это взаимодействие можно с помощью установки, показанной на рисунке 209.

От источника «питается» током закрепленный проволоочный контур с прямолинейной частью 1 и другой контур с прямолинейной частью 2 небольшой длины Δl . Этот маленький прямолинейный участок второго контура и есть элемент тока. Его можно различным образом располагать относительно проводника 1.

Пусть по длинному проводнику 1 течет ток I_1 (см. рис. 209), а через элемент тока 2 — ток I_2 . Если проводники 1 и 2 параллельны друг другу и токи I_1 и I_2 направлены в одну сторону (как это схематически показано на

рисунке 210, а), то направление силы $\vec{F}$, действующей на элемент тока, мы уже знаем: элемент тока притягивается к проводнику 1.

Сила $\vec{F}$ перпендикулярна проводнику 2.

Повернем теперь элемент тока так, чтобы он не был параллелен проводнику 1, но оставался с ним в одной плоскости (рис. 210, б). Сила $\vec{F}$ снова оказывается перпендикулярной проводнику 2 с током I_2 . Продолжая изменять положение элемента тока относительно проводника 1, мы увидим, что при любом положении элемента тока сила, действующая на него, перпендикулярна проводнику 2 (рис. 210, в, г, д). Поворачивая элемент тока, мы как бы поворачиваем вместе с ним и вектор силы $\vec{F}$.

В конце концов, когда токи I_1 и I_2 окажутся противоположно направленными (рис. 210, д), элемент тока будет отталкиваться от проводника 1.

Силы может и не быть. Проведем еще один опыт. Расположим элемент тока I_2 так, чтобы он был перпендикулярен плоскости страницы (рис. 211).

Опыт теперь показывает неожиданный результат — на элемент тока сила не действует: $F = 0$ (рис. 212). Токи могут и не взаимодействовать!

Закон Ампера. Модуль силы $\vec{F}$, действующей на элемент тока со стороны длинного прямолинейного проводника с током, можно измерить. Такие измерения показали, что для случая, когда проводники с током параллельны друг другу, по модулю эта сила выражается равенством

$$F = k_m \frac{I_1 I_2 \Delta l}{r}. \quad (1)$$

Здесь I_1 и I_2 — силы токов в прямолинейном проводнике и в элементе тока, r — расстояние между ними, Δl — длина элемента тока и k_m — коэффициент пропорциональности, который должен быть определен из опыта. Для этого нужно измерить силу F при известных значениях величин I_1 , I_2 , Δl и r .

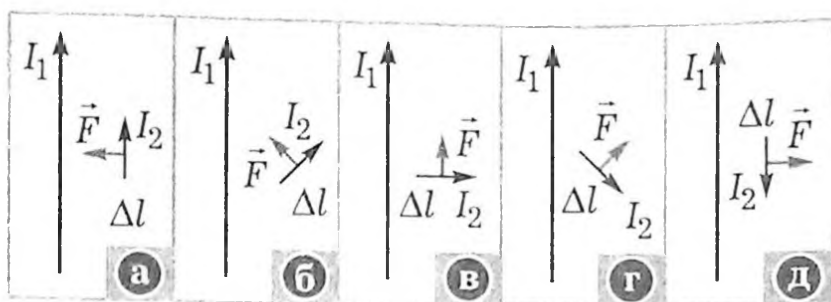


Рис. 210

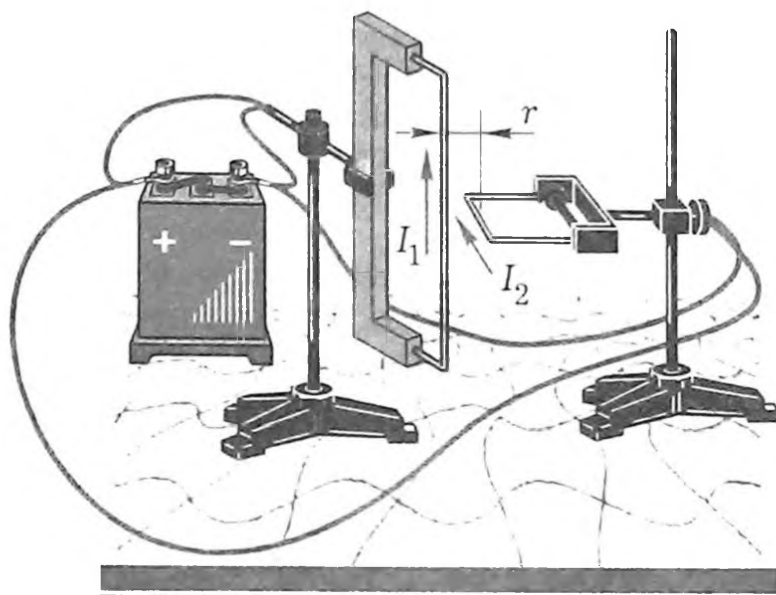


Рис. 211

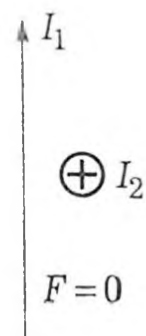


Рис. 212



Ампер
Андре Мари
(1775—1836)

Такие измерения показали, что

$$k_m = 2 \cdot 10^{-7} \text{ Н/А}^2.$$

По причинам, связанным с историей создания систем единиц, коэффициент k_m записывается в виде $k_m = \frac{\mu_0}{2\pi}$, и формула (1) принимает вид:

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I_1 I_2 \Delta l}{r}. \quad (2)$$

Постоянная μ_0 называется *магнитной постоянной*. Так как $k_m = 2 \cdot 10^{-7} \text{ Н/А}^2$, то $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6} \text{ Н/А}^2$.

Формулы (1) и (2) выражают *закон Ампера*, который так называется в честь открывшего его французского физика А. Ампера. Для магнитных сил закон

Ампера играет такую же роль, какую для электростатических сил играет закон Кулона.

Единица силы тока. Ампер. Сила тока, как уже указывалось, — одна из основных величин, на которых строится современная система единиц физических величин — СИ. Единица силы тока ампер (А) — одна из основных единиц СИ. Теперь мы можем сказать, что это за единица.

Единица силы тока ампер устанавливается на основе закона Ампера и определяется так: ампер — сила неизменяющегося тока, который, проходя по двум параллельным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого поперечного сечения, расположенным на расстоянии 1 м один от другого в вакууме, вызвал бы на каждом участке проводника длиной 1 м силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7} \text{ Н}$.

■ ВОПРОСЫ

1. Что такое магнитные силы? 2. Изменяется ли модуль силы, действующей на элемент тока со стороны прямолинейного проводника с током, в зависимости от взаимной ориентации проводников, когда они лежат в одной плоскости? Изменяется ли при этом направление вектора силы? 3. В каком случае два проводника с током не действуют друг на друга? 4. Как зависит сила взаимодействия двух токов от расстояния между ними?

§ 93

Магнитное поле электрического тока

При рассмотрении взаимодействия токов возникает такой же вопрос, как и при изучении взаимодействия зарядов: как передается на расстояние это взаимодействие? Ответ на этот вопрос такой же, как и для зарядов: действие одного тока на другой передается через поле. Но теперь это поле *магнитное*.

В любой точке пространства вокруг электрического тока существует магнитное поле. И вместо того чтобы говорить, что ток I_1 действует на элемент тока силой $\vec{F}$, лучше говорить, что на элемент тока действует с такой силой магнитное поле, окружающее ток I_1 в том месте, где находится элемент тока.

Магнитное поле существует, конечно, и в том случае, если никакого другого тока, на который оно бы действовало, нет. Этим другим током мы лишь обнаруживаем поле.

Магнитное поле нельзя описать так, как мы описывали привычные нам тела, хотя оно так же реально, как и тела, и обладает определенными

свойствами. Главное его свойство состоит в том, что оно действует с некоторой силой на находящийся в нем ток. Это свойство поля характеризуется особой величиной, называемой *магнитной индукцией*.

Магнитная индукция. Напомним, что электростатическое поле характеризуется напряженностью — величиной, равной отношению силы, действующей на заряд, к значению этого заряда. Магнитное поле тоже характеризуется величиной, играющей такую же роль, как и напряженность электростатического поля. Называют эту величину *индукцией магнитного поля* или *магнитной индукцией*. Магнитная индукция, как и напряженность электростатического поля, — векторная величина. Обозначают ее буквой $\vec{B}$.

Мы видели, что на заряд q в электростатическом поле действует сила qE , где E — модуль напряженности поля в том месте, где находится заряд q .

Когда идет речь о магнитной силе, роль точечного заряда играет элемент тока. Поэтому мы можем сказать, что в магнитном поле, созданном током I , на элемент тока действует сила F , которую по аналогии с формулой $F = qE$ можно выразить так: $F = I_1 \Delta l B$, где B — модуль вектора магнитной индукции в той точке, в которой находится элемент тока.

В предыдущем параграфе мы познакомились с законом Ампера, согласно которому на элемент тока $I_1 \Delta l$, расположенный на расстоянии r от прямолинейного тока I (в одной с ним плоскости), действует сила $\vec{F}$, модуль которой равен:

$$F = k_m \frac{II_1 \Delta l}{r}.$$

Сравнивая эту формулу с выражением $F = I_1 \Delta l B$, мы получаем для модуля вектора $\vec{B}$ индукции магнитного поля, созданного прямолинейным током I , такую формулу:

$$B = k_m \frac{I}{r}.$$

Магнитная индукция поля, созданного прямолинейным током в данной точке, пропорциональна силе тока и обратно пропорциональна расстоянию от него.

Единица магнитной индукции. Из формулы для силы, действующей на ток в магнитном поле,

$$F = BI_1 \Delta l$$

следует, что

$$B = \frac{F}{I_1 \Delta l}. \quad (1)$$

Отсюда видно, что единица магнитной индукции — это магнитная индукция такого поля, в котором на элемент тока $I_1 \Delta l = 1 \text{ А} \cdot \text{м}$ действует сила 1 Н. Магнитная индукция выражается, следовательно, в единицах Н/(А · м). Эта единица называется *тесла* (сокращенно: Тл) в честь югославского физика Н. Тесла.

Тесла очень крупная единица магнитной индукции. Достаточно сказать, что индукция магнитного поля Земли около 10^{-5} Тл. Индукция магнитного поля обычных постоянных магнитов не превышает 0,01 Тл. Даже в самых больших электромагнитах получают магнитные поля индукцией 4—5 Тл. Индукция сильных магнитных полей, которые можно получить на короткое время, достигает значения около 100 Тл.

Направление вектора индукции магнитного поля. Формула (1) определяет модуль вектора $\vec{B}$ магнитного поля прямолинейного тока. А как направлен этот вектор?

В отличие от электростатического поля, где направление вектора напряженности поля совпадает с направлением силы, действующей на положительный заряд, направление вектора магнитной индукции $\vec{B}$ *не совпадает* с направлением силы, действующей на ток в этом поле. Действительно, в предыдущем параграфе мы видели, что направление силы, действующей в одной и той же точке поля на один и тот же элемент тока, зависит от его ориентации, от угла между токами (см. рис. 210). Если бы сила, действующая в данной точке на элемент тока, совпала по направлению с направлением вектора магнитной индукции в этой точке, то это означало бы, что и направление вектора индукции $\vec{B}$ может быть в этой точке любым. Но этого не может быть. Вектор магнитной индукции характеризует поле в данной точке. И модуль вектора, и его направление вполне определенные и не зависят от того, есть ли в этой точке элемент тока и как он ориентирован. Отсюда следует, что вектор $\vec{B}$ в некоторой точке поля *не может лежать в плоскости*, содержащей и точку, и прямолинейный ток, в поле которого эта точка находится.

На рисунке 213 показана некоторая плоскость, в которой лежит прямолинейный ток I , и некоторая точка A . Мы хотим узнать направление вектора $\vec{B}$ в точке A .

Проведем мысленно из этой точки три координатные оси X , Y и Z , из которых оси X и Y лежат в самой плоскости, а третья ей перпендикулярна.

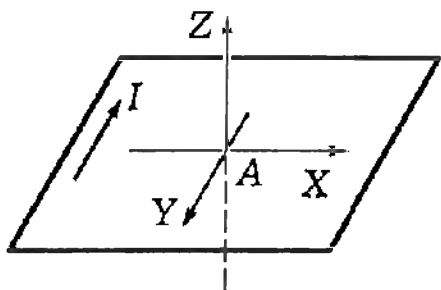


Рис. 213

Вектор индукции $\vec{B}$ в точке A не может быть, как мы только что видели, направлен ни вдоль оси X , ни вдоль оси Y . Значит, он может быть направлен только по оси Z , т. е. перпендикулярно плоскости, содержащей и точку A и ток I . Это значит, что вектор $\vec{B}$ перпендикулярен и силе, действующей на элемент тока, если бы он находился в точке A .

Как находят направление вектора $\vec{B}$? Есть два направления, перпендикулярные плоскости (вверх и вниз). Куда же направлен вектор $\vec{B}$?

Опыт показывает, что направление вектора магнитной индукции прямолинейного проводника с током определяется простым *правилом правого винта* (правилом буравчика):

Если мысленно буравчик ввинчивать так, чтобы он двигался по направлению тока, то направление движения концов его ручки указывает направление вектора магнитной индукции (рис. 214, а, б).

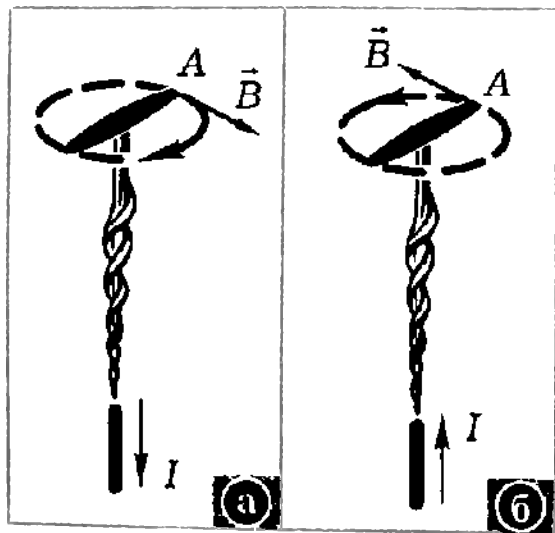


Рис. 214

Если, например, прямолинейный ток перпендикулярен плоскости страницы и направлен от читателя (на рисунке 215 такое направление условно изображено крестиком), то векторы магнитной индукции в точках, расположенных на одинаковых расстояниях от тока, направлены так, как показано на рисунке. При пользовании правилом буравчика надо помнить, что направление тока — это направление движения *положительных* зарядов.

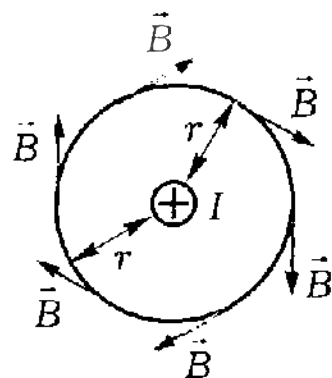


Рис. 215

Вектор индукции и вектор силы. Последний опыт, описанный в предыдущем параграфе, показал, что когда элемент тока перпендикулярен плоскости, содержащей прямолинейный ток, то сила, действующая на элемент тока, равна нулю. Но перпендикулярно этой плоскости направлен и вектор магнитной индукции поля. Это значит, что на ток, текущий вдоль направления магнитной индукции поля, созданного другим током, *сила не действует*. Этим магнитное поле существенно отличается от поля электрического.

■ ВОПРОСЫ

1. Какая величина характеризует магнитное поле в каждой его точке? 2. В каких единицах выражается индукция магнитного поля? 3. Как направлена сила, действующая на ток в магнитном поле, относительно самого тока? 4. Как направлена сила, действующая на ток в магнитном поле, относительно вектора индукции поля? 5. При каких направлениях тока и вектора индукции $\vec{B}$ сила, действующая на ток, равна нулю?

■ УПРАЖНЕНИЕ 40

1. Сила тока в длинном прямолинейном участке электрической цепи равна 1 А. Чему равен модуль вектора индукции в точке, расположенной на расстоянии 1 м от этого участка?

2. Сила тока в прямолинейном проводе, протянутом по потолку помещения и затем свисающем по стене (рис. 216), равна 10 А.

Чему равен модуль вектора магнитной индукции в точке O , отстоящей на $l_1 = 0,2$ м от провода на потолке и на $l_2 = 0,1$ м от провода на стене? Как направлен вектор $\vec{B}$?

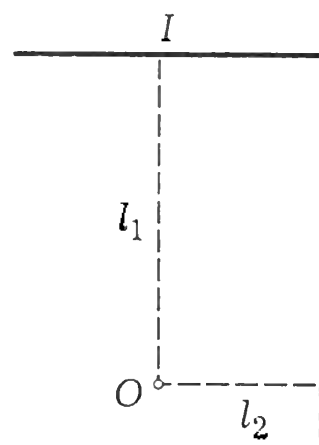


Рис. 216

§ 94 Графическое изображение магнитного поля

Изучая электростатическое поле, мы для его графического изображения пользовались силовыми линиями. Они позволили нам изобразить направление вектора напряженности поля и оценить ее численное значение. Направление указывает стрелка на силовой линии или стрелка на касательной к силовой линии. Модуль напряженности оценивается по густоте силовых линий.

Тот же способ используется и для изображения магнитного поля электрического тока.

Линии, но не силовые! Линии напряженности электростатического поля были названы силовыми, потому что линии поля и стрелки на **них** определяют направление не только вектора напряженности, но и вектора силы, действующей на заряд в каждой точке поля. В магнитном поле дело обстоит не так.

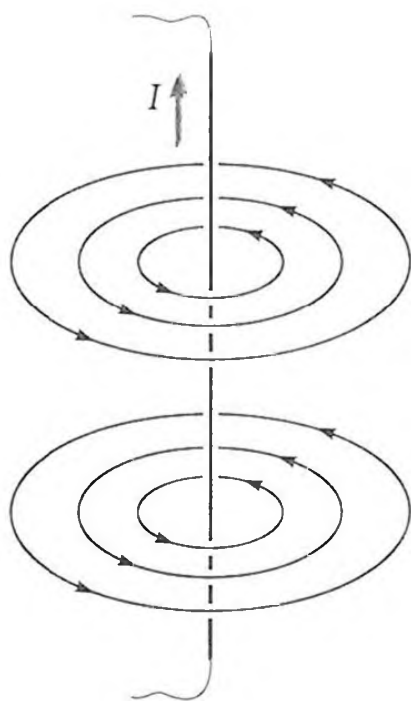


Рис. 217

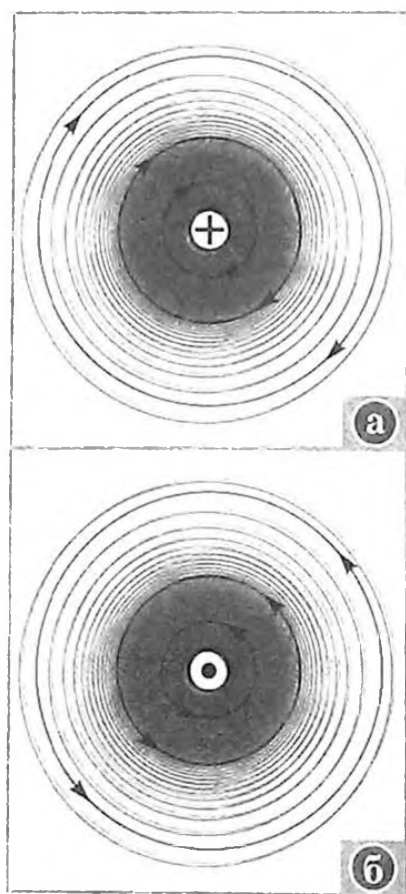


Рис. 218

В предыдущем параграфе мы выяснили, что когда ток в элементе тока направлен так же, как и вектор индукции, то сила на него не действует. Значит, сила, действующая на ток в магнитном поле, направлена не вдоль вектора индукции. Поэтому и линии, изображающие магнитное поле, не должны называться силовыми линиями. Их называют *линиями индукции магнитного поля* или просто *линиями индукции*.

Линиями индукции магнитного поля называются линии, по касательным к которым направлен вектор магнитной индукции $\vec{B}$.

Численное же значение магнитной индукции оценивается так же, как напряженность электростатического поля, — густотой линий индукции, т. е. числом линий, пересекающих поверхность единичной площади, перпендикулярную этим линиям.

Каковы они, линии магнитной индукции? Для определения направления вектора магнитной индукции поля прямолинейного тока (см. рис. 215) мы использовали правило буравчика. Из рисунка 215 видно, что все векторы лежат в плоскости, перпендикулярной току. На определенном расстоянии r от проводника все векторы $\vec{B}$ направлены по касательным к окружности, которая тоже показана на рисунке. Эта окружность и есть одна из линий магнитной индукции поля. Но, чтобы изобразить магнитное поле прямолинейного тока, одной окружности (одной линии) недостаточно. Ведь магнитное поле существует в любой точке вокруг тока. Таким образом, *линии магнитной индукции* — это концентрические окружности, охватывающие тот ток, магнитное поле которого они изображают. На рисунке 217 показаны линии индукции прямолинейного тока. Их направление (стрелки на линиях) соответствует правилу буравчика. На рисунке 218 дан как бы вид сверху. На рисунке 218, а представлены линии индукции поля прямолинейного тока, перпендикулярного плоскости страницы и направленного от читателя, а на рисунке 218, б — к читателю. По мере удаления от тока густота линий уменьшается, потому что уменьшается модуль вектора $\vec{B}$.

Если ток не прямолинейный? С магнитными полями, созданными прямолинейными токами, на практике приходится иметь дело редко. Значительно больший интерес представляют магнитные поля электрических то-

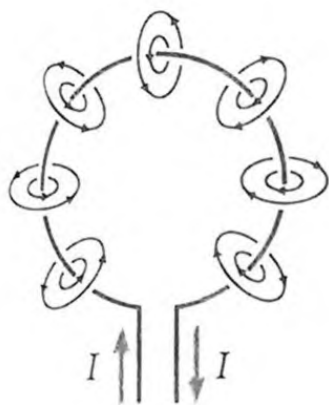


Рис. 219

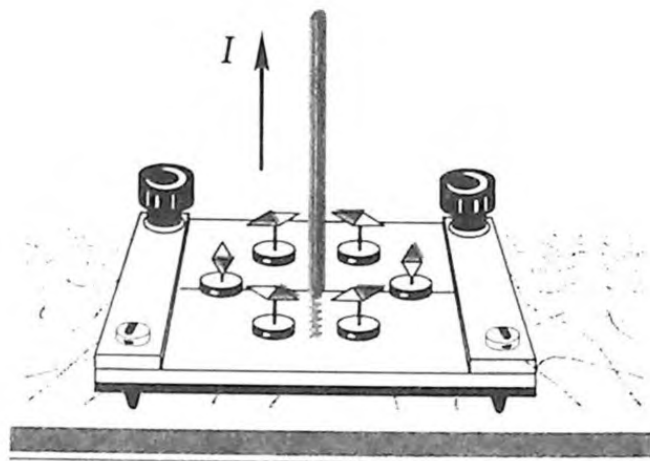


Рис. 220

ков, текущих в *катушках* (соленоидах) различного вида, состоящих из многих *витков*.

Виток можно получить, просто согнув прямолинейный проводник в кольцо. Какова картина линий индукции такого кольцевого тока?

Кольцевой проводник (как и проводник любой формы) можно считать составленным из множества очень малых участков, а каждый из них ввиду его малости можно считать прямолинейным. Такой малый участок окружен линиями магнитной индукции в виде концентрических окружностей (рис. 219).

Как «увидеть» линии магнитной индукции? Наглядное представление о линиях магнитной индукции можно получить, если разместить вокруг прямолинейного тока на одинаковых расстояниях от него магнитные стрелки, укрепленные на подставках так, чтобы они могли свободно поворачиваться.

Опыт показывает, что магнитные стрелки располагаются своими осями вдоль окружности, а их северные полюсы — в направлении вектора индукции поля (рис. 220). Направление вектора индукции — это и есть то направление, куда смотрят северные полюсы стрелок. Еще более ясную картину можно получить, если на лист стекла, сквозь который проходит проводник с током, насыпать железные опилки и встряхнуть их. Каждый кусочек железа в магнитном поле тока станет маленькой магнитной стрелкой и расположится вдоль вектора индукции поля. Так как таких стрелок очень много, они образуют почти сплошные окружности (рис. 221). Поле вокруг электрического тока потому и называют магнитным из-за такого поведения магнитных стрелок. Магнитное поле электрического тока было открыто в 1820 г. Х. Эрстедом именно из наблюдений поведения магнитной стрелки, помещенной вблизи прямолинейного провода с током.

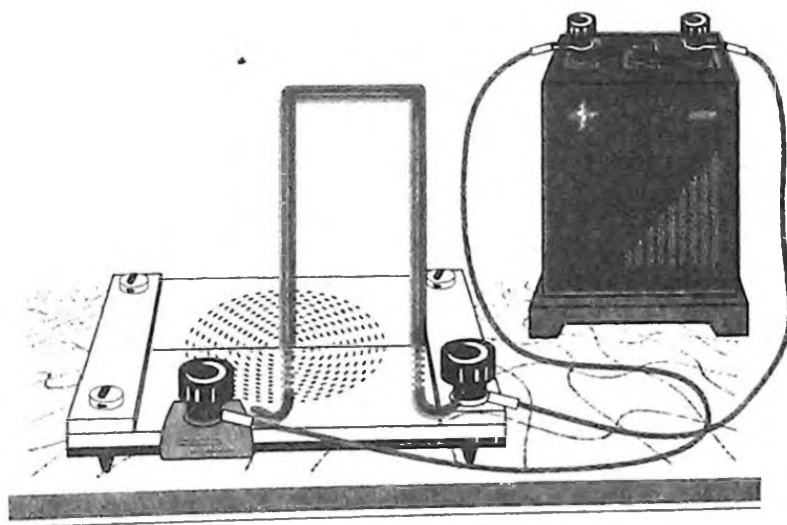


Рис. 221

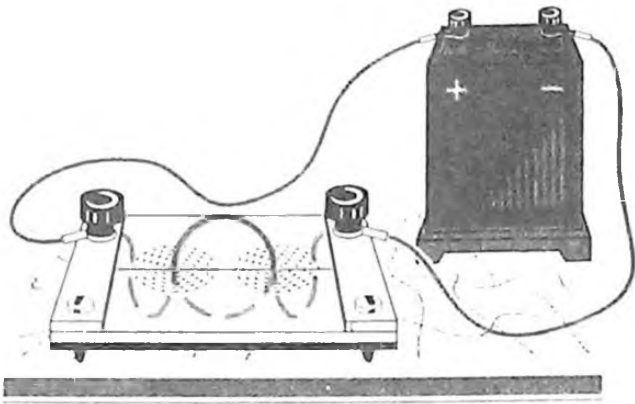


Рис. 222

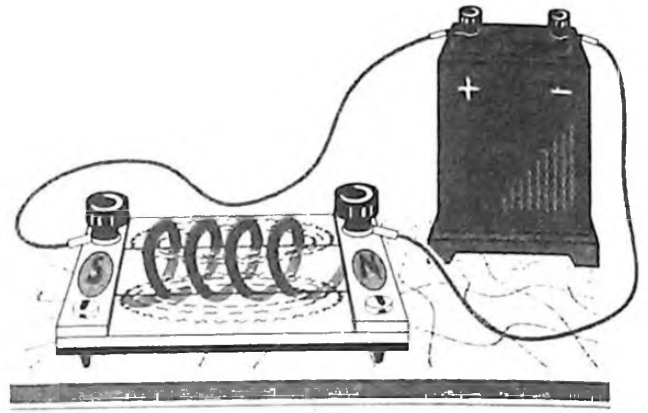


Рис. 223

На рисунке 222 показано магнитное поле кольцевого тока, а на рисунке 223 — магнитное поле соленоида, полученные с помощью тех же опилок.

Из опытов со стрелками или опилками нельзя делать вывод, что линии магнитной индукции реально существуют, что, быть может, это к ним «прилипают» железные опилки. Железные опилки располагаются соответственно тому, как на них действует магнитное поле. Магнитное поле и есть физическая реальность. Линии же индукции — это условные символы, служащие только для изображения магнитного поля.

Главная особенность магнитного поля. В § 73 мы видели, что силовые линии электрического поля имеют начало и конец: они начинаются на положительных зарядах и заканчиваются на отрицательных. Не таковы линии магнитной индукции: у них нет ни начала, ни конца. Так, линии индукции поля прямолинейного тока — это окружности. Линии индукции поля кольцевого тока или поля соленоида хотя и не окружности, но и они нигде не обрываются. Линии индукции магнитного поля электрического тока всегда замкнуты, они замыкаются сами на себя. Это самая главная особенность магнитного поля. Этим магнитное поле отличается от электростатического.

Магнитное поле может быть однородным. Хотя линии индукции магнитного поля замкнуты, но магнитное поле может быть однородным. Напомним, что однородное поле — это поле, у которого линии, его изображающие, параллельны друг другу. Из рисунка 223 видно, что поле внутри соленоида однородное — силовые линии внутри соленоида параллельные. Конечно, они замыкаются, но вне соленоида, где поле неоднородное. В этом отношении магнитное поле внутри соленоида похоже на электростатическое поле внутри конденсатора.

Магнитный поток. Мы уже говорили, что численное значение вектора индукции задается густотой линий индукции, т. е. числом линий магнитной индукции, пересекающих поверхность единичной площади, перпендикулярную линиям индукции. Это значит, что когда мы изображаем магнитное поле линиями индукции, то число линий считается таким, что модуль вектора магнитной индукции в данном месте поля равен густоте этих линий. Если обозначить площадь поверхности, которую мы мысленно помещаем перпендикулярно линиям индукции, буквой S , а число линий индукции, пересекающих ее, буквой Φ , то модуль вектора индукции $\vec{B}$ равен $\frac{\Phi}{S}$. Отсюда

$$\Phi = BS.$$

Часто встречаются случаи, когда линии магнитной индукции пересекают некоторое число параллельных друг другу поверхностей одинаковой площади. Примером может служить соленоид, помещенный в магнитное поле. В этом случае

$$\Phi = NBS,$$

где N — число витков соленоида, а S — площадь каждого витка.

Величина Φ называется *магнитным потоком* через поверхность площадью S , перпендикулярную линиям индукции.

Из выражения $\Phi = BS$ видно, что единицей магнитного потока служит $1 \text{ Тл} \cdot \text{м}^2$. Эта единица называется вебер (сокращенно: Вб):

$$1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot \text{м}^2.$$

Если поверхность, которую пересекает магнитный поток, не перпендикулярна линиям магнитной индукции, то магнитный поток через нее равен не BS , а $BS \cos \alpha$, где α — угол между вектором магнитной индукции $\vec{B}$ и нормалью к поверхности. Магнитный поток — величина скалярная.

■ ВОПРОСЫ

1. Чем отличаются линии индукции магнитного поля от силовых линий электростатического поля? 2. Как по картине линий индукции магнитного поля тока устанавливается направление вектора индукции $\vec{B}$? численное значение вектора $\vec{B}$? 3. Что такое однородное магнитное поле? Каким должен быть проводник с током, чтобы магнитное поле этого тока было однородным? 4. Что такое магнитный поток? В каких единицах он выражается? 5. На рисунке 224 показано магнитное поле кольцевого тока. Однородно ли это поле? В каких местах модуль вектора $\vec{B}$ наибольший?

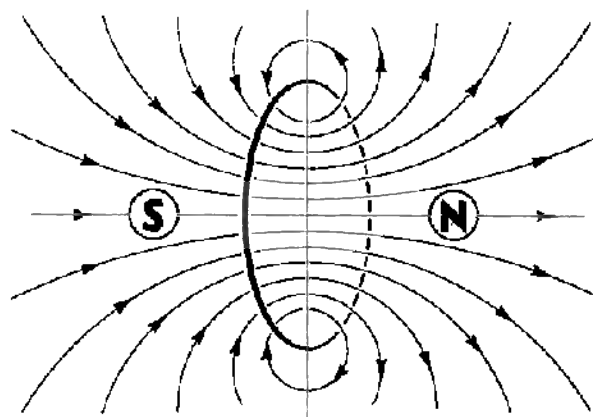


Рис. 224

■ УПРАЖНЕНИЕ 41

1. Кольцевая петля радиусом 10 см расположена своей плоскостью перпендикулярно вектору индукции магнитного поля. Чему равен магнитный поток через петлю, если $B = 0,2 \text{ Тл}$?
2. Чему равен магнитный поток через петлю (см. задачу 1), если плоскость петли параллельна вектору магнитной индукции $\vec{B}$?
3. Катушка, в которой 100 витков, расположена своей осью параллельно линиям индукции однородного магнитного поля. Чему равен магнитный поток через катушку, если $B = 0,1 \text{ Тл}$, а площадь каждого витка 15 см^2 ?

§ 95

Силы, действующие на электрический ток в магнитном поле

Мы знаем, что на ток, помещенный в магнитное поле, действует сила, но может и не действовать. Если же сила *действует*, то ее направление не совпадает с направлением вектора индукции поля. Как же направлена эта сила?

В магнитном поле **прямолинейный проводник с током**. В § 92 мы видели, что, когда элемент тока находится в магнитном поле, на него действует

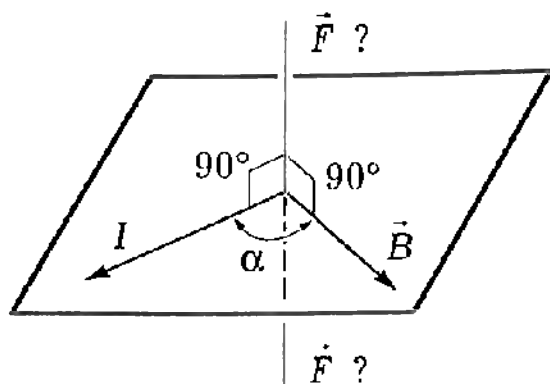


Рис. 225

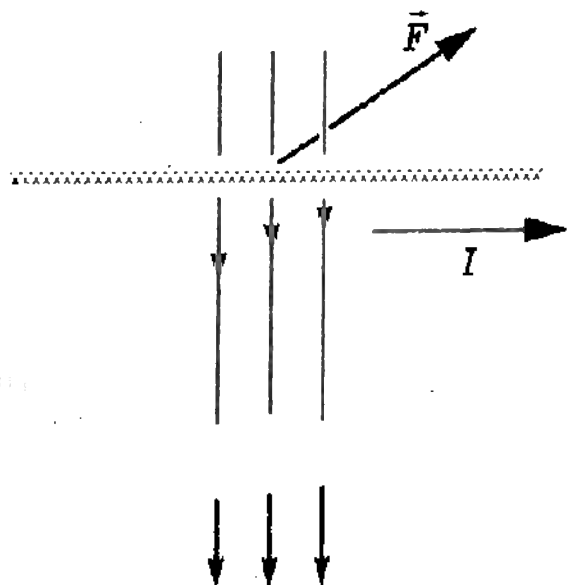


Рис. 226

сила $\vec{F}$, направленная перпендикулярно к направлению тока в нем. С другой стороны, мы теперь знаем, что вектор индукции магнитного поля в точке, где находился элемент тока, перпендикулярен плоскости, в которой лежит этот элемент. Значит, сила $\vec{F}$, действующая на прямолинейный ток в магнитном поле, перпендикулярна не только току, на который она действует, но и индукции поля (рис. 225).

Правило левой руки. Вдоль прямой, перпендикулярной элементу тока и вектору магнитной индукции, есть два взаимно противоположных направления (см. рис. 225), и нужно уметь определять, по какому из них направлена сила. Для этого существует простое, легко запоминающееся *правило левой руки*:

Если ладонь левой руки расположить так, чтобы линии магнитной индукции «входили» своими стрелками в ладонь, а четыре вытянутых пальца указывали направление тока, то отогнутый большой палец покажет направление силы, действующей на ток (рис. 226).

Формула для модуля силы. Сила $\vec{F}$, действующая на ток, перпендикулярна и току, и линиям индукции поля. Но угол между направлением тока в проводнике и

вектором индукции $\vec{B}$ может быть любым: ведь проводник с током можно как угодно расположить в магнитном поле!

В § 92 мы познакомились с законом Ампера, согласно которому на проводник с током, помещенный в магнитное поле, созданное параллельным ему другим проводником с током, действует сила $\vec{F}$, модуль которой равен:

$$F = k_m \frac{I_1 I_2 \Delta l}{r}.$$

Но тогда речь шла о токе, направление которого перпендикулярно вектору $\vec{B}$ (угол α между B и направлением тока равен 90°). А когда ток параллелен вектору $\vec{B}$, сила $\vec{F}$ равна нулю. Следовательно, в формулу для силы $\vec{F}$ должен входить множитель, который обращается в нуль при $\alpha = 0$ и в единицу при $\alpha = 90^\circ$. Таким свойством обладает величина $\sin \alpha$. Поэтому формула для модуля силы $\vec{F}$ в общем случае имеет вид:

$$F = B I \Delta l \sin \alpha. \quad (1)$$

Эта формула, тоже выражающая закон Ампера, справедлива для любых магнитных полей и для любых токов, как бы они ни были ориентированы

относительно вектора индукции. Вместе с правилом левой руки она позволяет находить и модуль, и направление вектора силы, действующей на ток.

Закон Ампера не только для элемента тока. Вектор $\vec{B}$ характеризует какую-то *точку*. Между тем элемент тока имеет определенную, пусть и малую, длину Δl и в разных точках на этом участке индукция $\vec{B}$ может быть различной. Поэтому формулой (1) можно пользоваться только тогда, когда длина элемента Δl такова, что индукция во всех точках элемента может считаться одинаковой. Но если магнитное поле однородное, т. е. всюду одинаковы и модуль, и направление магнитной индукции, то длина проводника может быть любой, лишь бы проводник целиком находился в поле. Тогда формулу (1) можно переписать в виде

$$F = BIl \sin \alpha, \quad (2)$$

где l — длина проводника с током.

Замкнутый контур с током в однородном магнитном поле. И элемент тока, и прямолинейный проводник с током — это всегда часть какой-то цепи, потому что реальные электрические цепи могут быть только замкнутыми. Как магнитное поле действует на замкнутый контур с током?

Мы рассмотрим случай, когда замкнутый контур находится в однородном магнитном поле. Контур выберем в форме прямоугольной проволочной рамки (рис. 227). Ширина рамки равна b , длина — a , по ней течет ток I (источник ЭДС не показан); рамка расположена в однородном магнитном поле с магнитной индукцией $\vec{B}$ так, что ее плоскость параллельна вектору индукции $\vec{B}$.

Поведение рамки в магнитном поле определяется, конечно, тем, как действует магнитное поле на каждую из сторон рамки. Это мы и должны выяснить.

Из рисунка 227 видно, что на верхнюю и нижнюю стороны рамки магнитное поле не действует, потому что ток в них параллелен вектору магнитной индукции $\vec{B}$.

На левую сторону рамки сила действует, по модулю она равна $B Ia$ и направлена, как это следует из правила левой руки, перпендикулярно плоскости страницы (от нас).

На правую сторону рамки действует такая же по модулю сила, но направленная к нам.

Таким образом, на рамку в целом действуют две равные по модулю, но направленные в противоположные стороны параллельные друг другу силы. Из механики известно, что такая *пара сил* заставляет тело *поворачиваться* вокруг оси, проходящей через центр тяжести (на рисунке 227 ось показана пунктиром).

О силах (и даже одной силе), заставляющих тело поворачиваться или вращаться, говорят, что они создают *вращающий момент*. В частности, пара сил обладает вращающим моментом, равным произведению силы (в нашем

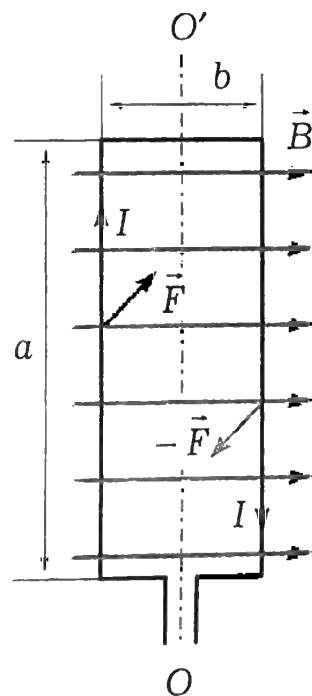


Рис. 227

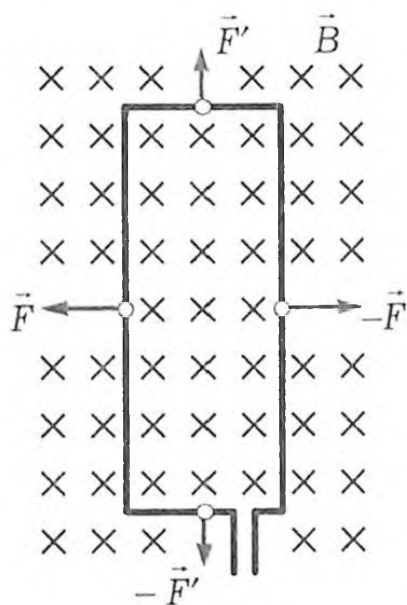


Рис. 228

рисунке 228. Пользуясь правилом левой руки и формулой (2), легко убедиться в том, что в этом положении и сумма всех сил, и вращающий момент равны нулю. Рамка находится в равновесии. Этим и заканчивается поворот.

Все сказанное относится не только к прямоугольной рамке. Любой замкнутый проводник с током в однородном магнитном поле ведет себя так же: он поворачивается и устанавливается так, чтобы его плоскость была

перпендикулярна вектору магнитной индукции $\vec{B}$.

Заметим, что вокруг замкнутого проводника с током существует и его «собственное» магнитное поле. С помощью правила буравчика можно убедиться в том, что замкнутый контур устанавливается в однородном магнитном поле так, чтобы направление индукции его «собственного» магнитного поля совпало с направлением индукции того внешнего поля, которое заставило его повернуться. Совершенно таким же образом ведет себя и катушка с током.

■ ВОПРОСЫ

1. Как направлена сила, действующая на прямолинейный проводник с током относительно тока в проводнике? относительно вектора индукции $\vec{B}$?
2. При каком значении угла между направлением тока I в проводнике и вектором индукции $\vec{B}$ сила, действующая на ток, максимальна? равна нулю?
3. Как ведет себя замкнутый контур с током в однородном магнитном поле, если контур расположен своей плоскостью параллельно вектору индукции поля? Чему равен вращающий момент, действующий на контур в этом положении?
4. Чему равен вращающий момент, действующий на контур с током, когда плоскость контура перпендикулярна вектору индукции поля? Чему равна равнодействующая всех сил, приложенных к контуру в этом его положении?
5. На рисунке 229 показаны различные варианты положения проводников с током в магнитном поле постоянного магнита. Определите направление тока в проводнике

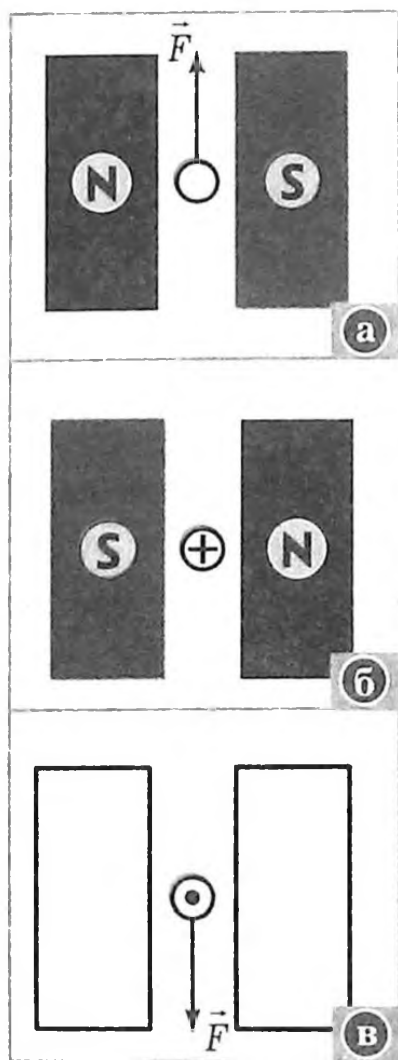


Рис. 229

(рис. 229, а); направление силы $\vec{F}$ (рис. 229, б); направление вектора магнитной индукции $\vec{B}$ (рис. 229, в).

■ УПРАЖНЕНИЕ 42

1. Прямой провод длиной 20 см находится в однородном магнитном поле, индукция которого равна 0,1 Тл. Сила тока в проводе равна 20 А. Каков угол между направлениями тока и вектора индукции, если на провод действует сила 0,2 Н?
2. Прямой провод длиной 10 см помещен в однородное магнитное поле, магнитная индукция которого равна 0,2 Тл. Определите силу, действующую на проводник, если сила тока в нем 5 А, а угол между направлениями тока и вектора индукции равен 30° .
3. В однородное магнитное поле, индукция которого равна 0,3 Тл, помещена рамка длиной 20 см и шириной 15 см. Сила тока в рамке 2 А. Плоскость рамки параллельна вектору магнитной индукции. Чему равен вращающий момент, действующий на рамку?
4. В однородном магнитном поле с индукцией $\vec{B}$, равной по модулю 0,5 Тл, находится квадратная рамка со стороной 10 см. Плоскость рамки параллельна вектору индукции поля и сила тока в ней 10 А. Чему равен вращающий момент?
5. В однородном поле с индукцией, равной 0,5 Тл, находится рамка площадью 0,04 м². Чему равен вращающий момент, действующий на рамку, если сила тока в ней 2,5 А и плоскость рамки параллельна магнитной индукции поля?

■ ЗАДАНИЕ

Проанализируйте задачи 4 и 5 и объясните, почему у них одинаковые ответы. От какого параметра, относящегося к рамке с током, зависит вращающий момент, действующий на нее при заданных значениях индукции поля?

§ 96 Магниты

Замкнутый проводник с электрическим током (рамка, виток, катушка) определенным образом ориентируется в однородном поле. Таким свойством ориентироваться в магнитном поле обладают не только замкнутые контуры. Хорошо известно, что магнитные стрелки в компасах в однородном магнитном поле Земли ориентируются так, что один конец стрелки обращен на север, другой — на юг. Таким свойством обладают не только стрелки компасов, но и всякий *постоянный магнит*. В однородном магнитном поле такой магнит, если ему ничто не мешает, располагается так, что его длинная ось направлена вдоль вектора магнитной индукции.

Магнит похож на соленоид, а соленоид — на магнит. Вокруг магнита, как и вокруг проводника с электрическим током, существует магнитное поле. Его тоже можно изучить, например, с помощью железных опилок. Опыт показывает, что картина линий индукции магнитного поля магнита поразительно похожа на картину линий индукции магнитного поля соленоида (рис. 230, 231). В обоих случаях магнитное поле у концов неоднородное, а вдали от их краев магнитное поле слабое — мала густота линий

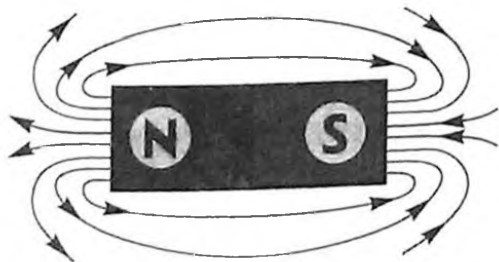


Рис. 230

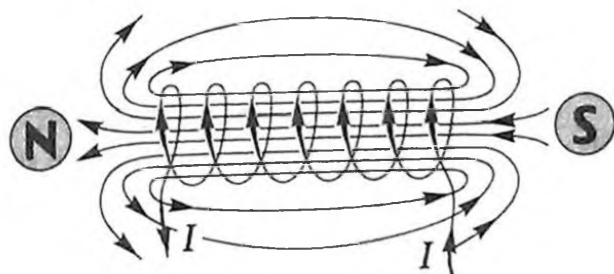


Рис. 231

индукции. У магнита, как и у соленоида, линии индукции как бы выходят из одного конца и входят в другой (из северного полюса в южный).

Эти факты навели на мысль о том, что внутри магнита имеется много маленьких контуров с током. Соленоид тоже состоит из таких контуров — витков. Отсюда и сходство магнитных полей.

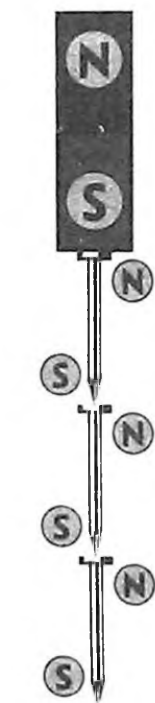
Магниты, следовательно, похожи на соленоиды. Но и соленоиды похожи на магниты. Свободно подвешенный соленоид с током, как и магнит, ориентируется в однородном магнитном поле. Можно было бы и компас изготовить со стрелкой — маленьким соленоидом с током.

Магнитное притяжение и отталкивание. Если приблизить друг к другу два магнита так, чтобы северный полюс одного из них был обращен к южному полюсу другого, то они станут притягиваться один к другому. Совершенно таким же образом притягиваются и два соленоида с током, если их обратить друг к другу разноименными полюсами.

Если близко друг к другу оказываются одноименные полюсы магнитов или соленоидов с токами, то они отталкиваются. Притягиваются и отталкиваются соленоид и магнит. Словом, о магнитах и соленоидах с токами можно сказать, что они взаимозаменяемы.

Но почему происходит это притяжение или отталкивание? Объясняется это тем, что вне магнита и вне соленоида магнитное поле *неоднородное*, а в неоднородном поле происходит не только поворот замкнутых токов, но и поступательное движение в сторону возрастания густоты линий индукции поля, т. е. в сторону возрастания индукции $\vec{B}$.

Притяжение железа. Магнитное притяжение наблюдается не только между двумя магнитами, обращенными друг к другу разноименными полюсами. Свойством притягиваться к магниту обладает любой кусок железа (а также никеля, кобальта и гадолиния). Объясняется такое притяжение тем, что кусок железа в магнитном поле магнита сам становится магнитом (намагничивается), причем ближайший к полюсу край куска железа становится полюсом нового магнита, но полюсом, разноименным полюсу магнита. Поэтому они и притягиваются друг к другу. Противоположный конец куска железа становится полюсом, одноименным полюсу магнита, так что притянувшийся к магниту кусок железа как бы удлиняет магнит и сам может притягивать к себе другой кусок железа (рис. 232).



Электромагнит. На свойстве железа намагничиваться основано устройство *электромагнитов*. Железо может быть намагничено не только в магнитном поле магнита, но и в магнитном поле соленоида. Если поместить в соленоид железный стержень и пропустить через соленоид ток, то стержень намагнитится и его собственное магнитное поле во много раз усилит поле соленоида. Такая комбинация соленоида и железного сердечника называется *электромагнитом*. Электромагниты используются в технических приборах.

С помощью электромагнитов и постоянных магнитов, если придать подходящую форму сердечникам электромагнитов или постоянным магнитам, можно получать однородные поля. На рисунке 233 схематически показано устройство современного электромагнита, в котором между полюсами магнитное поле практиче-

Рис. 232

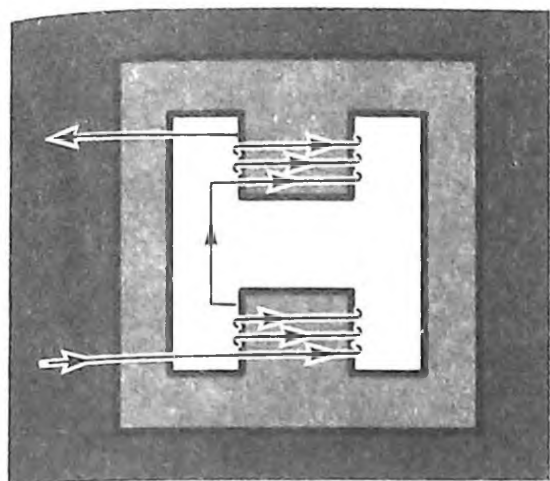


Рис. 233

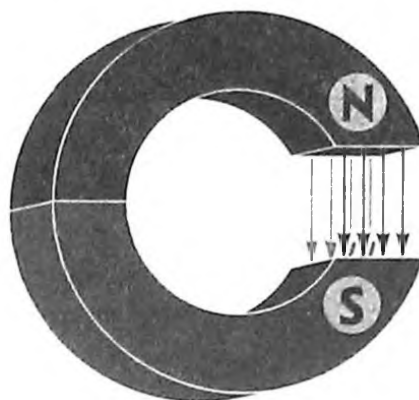


Рис. 234

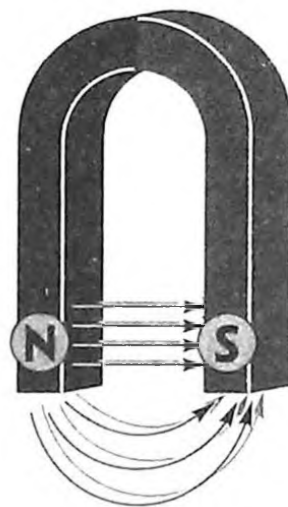


Рис. 235

ски однородно (линии индукции параллельны). На рисунке 234 показан постоянный магнит С-образной формы. Между его полюсами магнитное поле тоже однородное. Приблизительно однородно магнитное поле и вблизи полюсов дугообразного магнита (рис. 235).

■ ВОПРОСЫ

1. В чем состоит сходство между постоянными магнитами и соленоидами с токами?
2. На рисунке 235 показаны линии индукции поля постоянного магнита. Но линии индукции должны быть замкнуты. Как замыкаются они в этом случае?

§ 97

Практические применения свойств замкнутого проводника с током в магнитном поле

Силы, действующие на электрический ток в магнитном поле, широко используются в технике. Электродвигатели и генераторы, устройства для записи звука в магнитофонах, телефоны и микрофоны — во всех этих и во множестве других приборов и устройств используется взаимодействие токов, токов и магнитов и т. д.

Электрический двигатель. Основная часть двигателя — это контур (рамка, катушка), расположенный в сильном магнитном поле электромагнита (рис. 236). (На этом рисунке электромагнит не показан, показано только направление вектора индукции созданного им поля.) Такой контур в магнитном поле не вращается, а только поворачивается. Повернувшись и расположившись так, чтобы его плоскость была перпендикулярна линиям индукции поля, контур должен остановиться. Но если через каждую половину оборота изменять направление тока в нем на противоположное, то контур будет вращаться непрерывно. Изменение направления тока производится автоматически с помощью простого устройства, называемого *коллектором* (К на рисунке 236). Он состоит из двух металлических полуцилиндров, к которым присо-

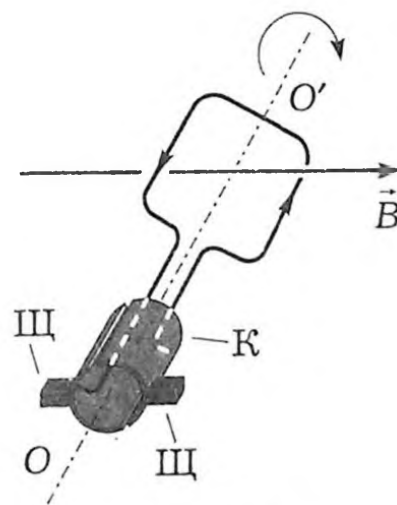


Рис. 236

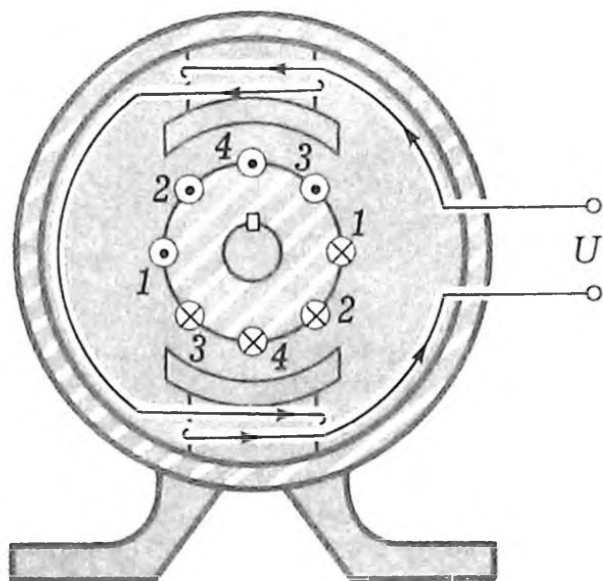


Рис. 237

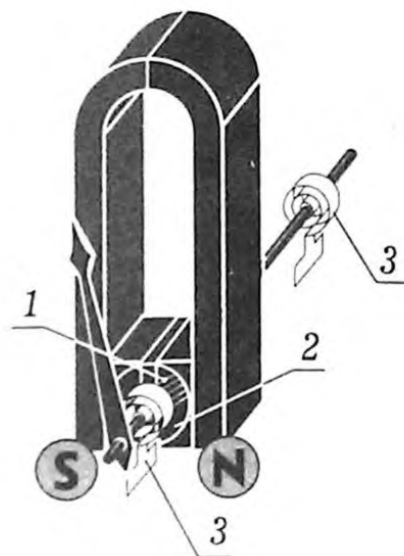


Рис. 238

единены концы контура. Через них и скользящие щетки *Щ* контур присоединяется к источнику тока.

В реальных двигателях имеется не один, а несколько контуров, намотанных на железный сердечник (ротор двигателя). Магнитное поле, в котором вращается ротор, создается электромагнитами на статоре. Схематически это показано на рисунке 237. Здесь на роторе намотано 4 контура (1—1, 2—2, 3—3 и 4—4). Ток от источника напряжения *U* подается и в электромагниты статора, и в обмотки ротора (через не показанный на рисунке коллектор). Такие двигатели постоянного тока используются на транспорте, на подъемных кранах, во многих бытовых электрических устройствах.

Электроизмерительные приборы. Действие магнитного поля на контур с током используется и в электроизмерительных приборах — в тех амперметрах и вольтметрах, о которых говорилось в предыдущей главе. Наиболее распространенный тип прибора — прибор *магнитоэлектрической* системы схематически показан на рисунке 238.

Между полюсами постоянного магнита помещается маленькая подвижная плоская катушка 1. Внутри ее находится цилиндр 2 из мягкого железа. На концах оси рамки укреплены две спиральные пружинки 3 и стрелка. Пружинки удерживают рамку в определенном положении равновесия. По ним же к рамке подводится измеряемый ток. При прохождении тока через рамку она поворачивается. При этом пружинки деформируются и возникает упругая сила, вращающий момент которой пропорционален углу поворота рамки. Вращающий момент создает и магнитная сила, но он зависит от силы тока в рамке. Знаки этих двух вращающих моментов противоположны, и угол поворота рамки оказывается пропорциональным силе тока в ней. Силу измеряемого тока отсчитывают по положению стрелки, скрепленной с осью рамки, на шкале, не показанной на рисунке.

■ ВОПРОСЫ

1. На каком явлении основано действие электрического двигателя? 2. Как изменится движение ротора двигателя, схема которого показана на рисунке 237, если изменить направление тока в обмотках ротора на противоположное? в обмотках ротора и статора одновременно? 3. Как вела бы себя рамка с током в магнитоэлектрическом приборе, если бы не было пружинки?

В § 95 мы выяснили, что на участок проводника с током длиной l , находящегося в однородном магнитном поле, действует сила, модуль которой равен

$$F = BIl \sin \alpha. \quad (1)$$

Здесь I — сила тока в проводнике, B — модуль магнитной индукции и α — угол между направлениями тока и вектора B . Но электрический ток — это движущиеся с некоторой скоростью и заряженные частицы. А действие поля на проводник с током — это в сущности действие магнитного поля на движущиеся в проводнике заряженные частицы. С какой же силой магнитное поле действует на *каждую* движущуюся частицу?

Сила Лоренца. Пусть заряд частицы равен q_0 . Тогда «сила тока» от ее движения равна $\frac{q_0}{t}$, где t — это промежуток времени, в течение которого частица проходит путь, равный длине l участка проводника (в течение этого времени на нее и действует сила). Согласно формуле (1) на этот «ток» действует сила, равная $B \frac{q_0}{t} l \sin \alpha$. Но величина $\frac{l}{t}$ в этом выражении — это модуль скорости $\vec{v}$ частицы, так что сила, с которой поле действует на частицу, равна $Bq_0v \sin \alpha$, где α — угол между векторами $\vec{v}$ и $\vec{B}$. Называют эту силу *силой Лоренца* и обозначают F_L :

$$F_L = Bq_0v \sin \alpha. \quad (2)$$

Силой Лоренца называется сила, с которой магнитное поле действует на движущуюся заряженную частицу.

Из формулы (2) видно, что, когда частица движется вдоль линий индукции (т. е. угол α равен нулю или 180°), сила на нее не действует. Максимального значения сила Лоренца достигает при угле $\alpha = 90^\circ$, т. е. когда частица движется перпендикулярно вектору индукции магнитного поля.

Для нахождения направления силы Лоренца тоже можно пользоваться правилом левой руки, но теперь пальцы ладони надо направить в сторону движения (т. е. направления скорости) *положительного* заряда. Если движущимися частицами являются электроны, пальцы надо направить против направления их движения.

Сила Лоренца перпендикулярна и скорости движения частиц, и вектору $\vec{B}$ индукции магнитного поля (рис. 239).

Сила Лоренца не только для частиц в проводнике. Сила Лоренца действует не только на частицы, движущиеся внутри проводника в магнитном поле, но и на любые заряженные частицы, движущиеся в магнитном поле. А с такими свободными частицами, движущимися вне каких бы то ни

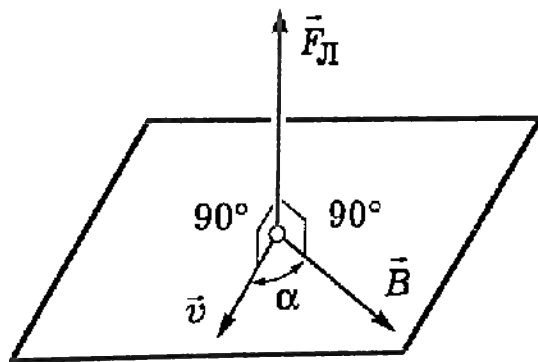


Рис. 239

было проводников, мы встречаемся и в природе, и во многих технических устройствах. В природе, например, сила Лоренца отклоняет заряженные частицы, вторгающиеся из космоса и попадающие в магнитное поле Земли, к полярным областям, где они вызывают полярные сияния. С помощью силы Лоренца управляют движением электронов в телевизионных электронных трубках, в ускорителях и т. д.

Центростремительное ускорение под действием силы Лоренца. Сила Лоренца, как мы видели, перпендикулярна скорости частицы. Поэтому она, как всякая сила, перпендикулярная скорости, сообщает частицам центростремительное ускорение, равное $\frac{v^2}{r}$. Если скорость частицы постоянная, магнитное поле однородное, а скорость частицы перпендикулярна вектору индукции магнитного поля, то траекторией частицы будет окружность (рис. 240). Радиус окружности определяется из формулы

$$F_{\text{Л}} = Bq_0v = \frac{mv^2}{r},$$

где m — масса частицы. Для радиуса окружности r получаем выражение

$$r = \frac{mv}{q_0B}.$$

Эта особенность силы Лоренца — сообщать частицам центростремительное ускорение — широко используется в современных ускорителях заряженных частиц.

■ ВОПРОСЫ

1. Как направлена сила Лоренца относительно скорости движения частицы? относительно вектора индукции магнитного поля?
2. На рисунке 241 показана заряженная частица, направление ее скорости и направление силы, действующей на частицу со стороны магнитного поля, линии индукции которого направлены перпендикулярно плоскости страницы к нам. Каков знак заряда частицы?
3. На рисунке 242 показана окружность, по которой движется заряженная частица в однородном магнитном поле, линии индукции которого направлены перпендикулярно плоскости страницы к нам. Каков знак заряда частицы?
4. Совершает ли сила Лоренца работу?

■ ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Положительно заряженная частица (протон) со скоростью $1,5 \cdot 10^7$ м/с влетает в магнитное поле перпендикулярно линиям магнитной индукции. Индукция магнитного поля равна 1 Тл. Найдите радиус окружности, по которой будет двигаться протон. Вычислите время одного оборота протона (период обращения). Изменится ли период обращения, если изменить скорость частицы? Масса протона равна $1,67 \cdot 10^{-27}$ кг, заряд $1,7 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Решение. В магнитном поле на заряженную частицу действует сила Лоренца $F_{\text{Л}} = q_0vB \sin \alpha$. В данном случае угол $\alpha = 90^\circ$ и, следовательно,

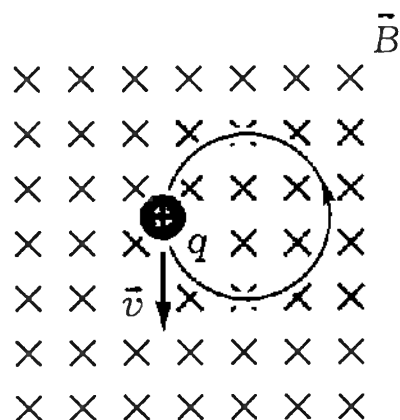


Рис. 240

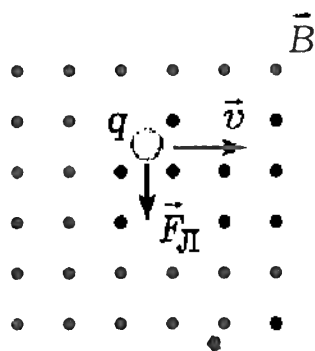


Рис. 241

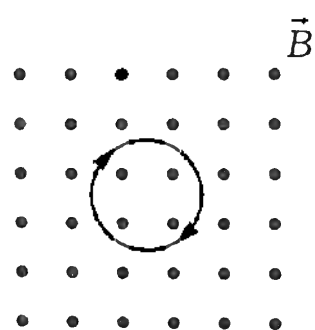


Рис. 242

было проводников, мы встречаемся и в природе, и во многих технических устройствах. В природе, например, сила Лоренца отклоняет заряженные частицы, вторгающиеся из космоса и попадающие в магнитное поле Земли, к полярным областям, где они вызывают полярные сияния. С помощью силы Лоренца управляют движением электронов в телевизионных электронных трубках, в ускорителях и т. д.

Центростремительное ускорение под действием силы Лоренца. Сила Лоренца, как мы видели, перпендикулярна скорости частицы. Поэтому она, как всякая сила, перпендикулярная скорости, сообщает частицам центростремительное ускорение, равное $\frac{v^2}{r}$. Если скорость частицы постоянная, магнитное поле однородное, а скорость частицы перпендикулярна вектору индукции магнитного поля, то траекторией частицы будет окружность (рис. 240). Радиус окружности определяется из формулы

$$F_{\text{Л}} = Bq_0v = \frac{mv^2}{r},$$

где m — масса частицы. Для радиуса окружности r получаем выражение

$$r = \frac{mv}{q_0B}.$$

Эта особенность силы Лоренца — сообщать частицам центростремительное ускорение — широко используется в современных ускорителях заряженных частиц.

■ ВОПРОСЫ

1. Как направлена сила Лоренца относительно скорости движения частицы? относительно вектора индукции магнитного поля? 2. На рисунке 241 показана заряженная частица, направление ее скорости и направление силы, действующей на частицу со стороны магнитного поля, линии индукции которого направлены перпендикулярно плоскости страницы к нам. Каков знак заряда частицы? 3. На рисунке 242 показана окружность, по которой движется заряженная частица в однородном магнитном поле, линии индукции которого направлены перпендикулярно плоскости страницы к нам. Каков знак заряда частицы? 4. Совершает ли сила Лоренца работу?

■ ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Положительно заряженная частица (протон) со скоростью $1,5 \cdot 10^7$ м/с влетает в магнитное поле перпендикулярно линиям магнитной индукции. Индукция магнитного поля равна 1 Тл. Найдите радиус окружности, по которой будет двигаться протон. Вычислите время одного оборота протона (период обращения). Изменится ли период обращения, если изменить скорость частицы? Масса протона равна $1,67 \cdot 10^{-27}$ кг, заряд $1,7 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Решение. В магнитном поле на заряженную частицу действует сила Лоренца $F_{\text{Л}} = q_0vB \sin \alpha$. В данном случае угол $\alpha = 90^\circ$ и, следовательно,

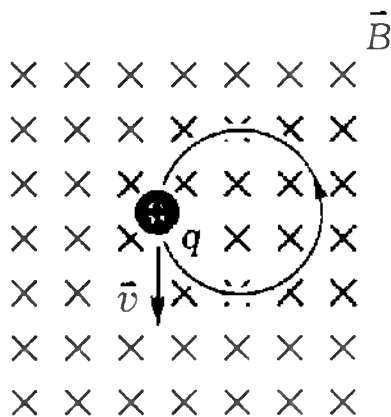


Рис. 240

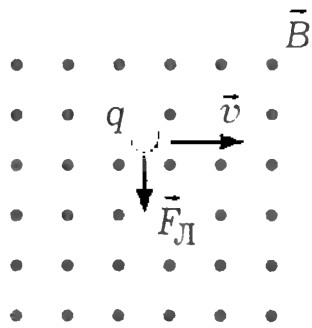


Рис. 241

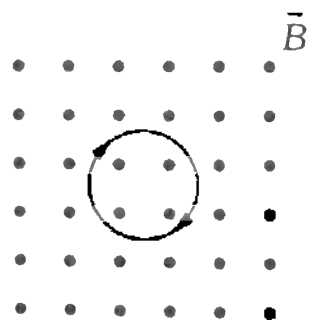


Рис. 242

$F = q_0 v B$. Так как сила Лоренца перпендикулярна скорости протона, то он будет двигаться по окружности и сила Лоренца будет выполнять функцию центростремительной силы:

$$F_{\text{Л}} = F_{\text{ц.с}}, \quad \text{или} \quad q_0 v B = \frac{mv^2}{R}. \quad (1)$$

Из равенства (1) получаем формулу для радиуса окружности:

$$R = \frac{mv}{q_0 B}. \quad (2)$$

Период обращения протона можно найти по формуле $T = \frac{2\pi R}{v}$ или с учетом формулы (2):

$$T = \frac{2\pi m}{q_0 B}.$$

Из этого выражения видно, что период обращения протона не зависит от скорости его движения.

■ УПРАЖНЕНИЕ 43

1. Электрон, скорость которого $2 \cdot 10^8$ м/с, попадает в однородное магнитное поле индукцией 0,5 Тл. Направление скорости электрона перпендикулярно вектору индукции поля. Вычислите силу, действующую на электрон, и радиус окружности, по которой он движется. Модуль заряда и масса электрона соответственно равны $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл и $9 \cdot 10^{-31}$ кг.
2. Пучок электронов, скорость которых 10^8 м/с, влетает в однородное магнитное поле, линии индукции которого направлены от читателя (рис. 243). При этом часть траектории электронов представляет собой дугу окружности радиусом 10 см. Вычислите силу, действующую на электрон. Чему равен модуль вектора индукции магнитного поля?

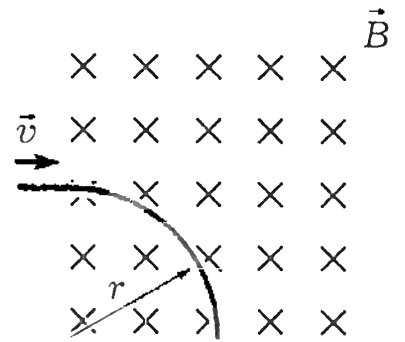


Рис. 243

§ 99

Возникновение электродвижущей силы при движении проводника в магнитном поле

В предыдущем параграфе мы выяснили, что магнитное поле действует не только на проводник с током, но и на каждый электрон, движущийся в поле. Это приводит к возникновению электродвижущей силы на концах движущегося в магнитном поле проводника. Почему это происходит?

Представим себе два параллельных проводника в виде, например, пластин. С одной стороны они замкнуты через прибор А, измеряющий силу тока, с другой — металлической перемычкой К, которая может передвигаться вдоль пластин (рис. 244). Все это вместе образует замкнутый контур $abcd$. Допустим, что этот контур помещен в магнитное поле, индукция которого перпендикулярна его плоскости.

Будем перемещать подвижную перемычку, например вправо, с постоянной скоростью $\vec{v}$. При этом по показаниям прибора мы увидим, что, пока перемычка движется, по контуру течет электрический ток.

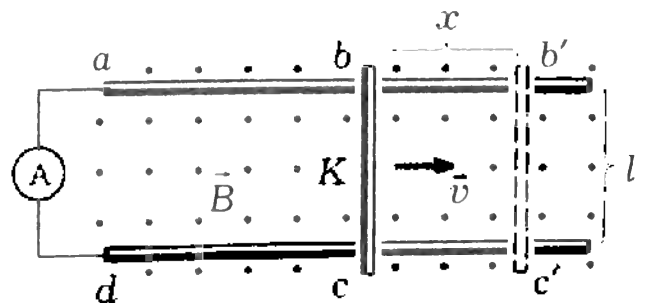


Рис. 244

Почему возникает ток в цепи, в которой нет источника тока? Ведь ток в цепи не может течь, если нет электродвижущей силы!

Но здесь электродвижущая сила есть. Она возникает в движущейся перемычке. И вот почему. Когда перемычка K движется, вместе с ней движутся и имеющиеся в ней электроны. Двигутся они перпендикулярно индукции магнитного поля, и поэтому на них действует сила Лоренца $\vec{F}_L$, равная по модулю qvB . Сила Лоренца перпендикулярна и скорости $\vec{v}$, и индукции $\vec{B}$. Значит, она направлена вдоль проводника K . Эта сила сообщает электронам ускорение, и они перемещаются вдоль проводника K . В результате на одном из концов проводника появляется избыток электронов, а на другом — избыток положительных зарядов. Поэтому между концами перемычки возникает разность потенциалов, т. е. перемычка становится «источником» ЭДС. Вычислим эту ЭДС.

При перемещении электронов в «источнике» от одного конца перемычки до другого, т. е. на расстояние l , совершается работа

$$A = F_L l = qvBl. \quad (1)$$

ЭДС же равна, как мы знаем, отношению работы к значению заряда. Следовательно,

$$\mathcal{E} = \frac{A}{q},$$

или

$$\mathcal{E} = vBl.$$

(2)

Такая ЭДС и возникает в любом проводнике, когда он движется в магнитном поле так, что его скорость перпендикулярна и собственной длине, и магнитной индукции поля, или, короче, когда он пересекает линии индукции магнитного поля. Проводник становится источником ЭДС.

В наших рассуждениях следовало бы учесть тот факт, что сила Лоренца в действительности перпендикулярна не скорости проводника $\vec{v}$, а скорости электронов $\vec{v}'$, равной $\vec{v} + \vec{u}$, где $\vec{u}$ — скорость движения электронов вдоль проводника (рис. 245).

Поэтому для вычисления работы нужно было бы в формулу (1) подставить силу, равную (по модулю) проекции силы Лоренца на ось Y . Но и скорость электронов $\vec{v}'$ не совпадает со скоростью перемычки $\vec{v}$. Если мы учтем оба уточнения, то получим для ЭДС ту же формулу (2)¹. Кроме того, не равна нулю проекция силы Лорен-

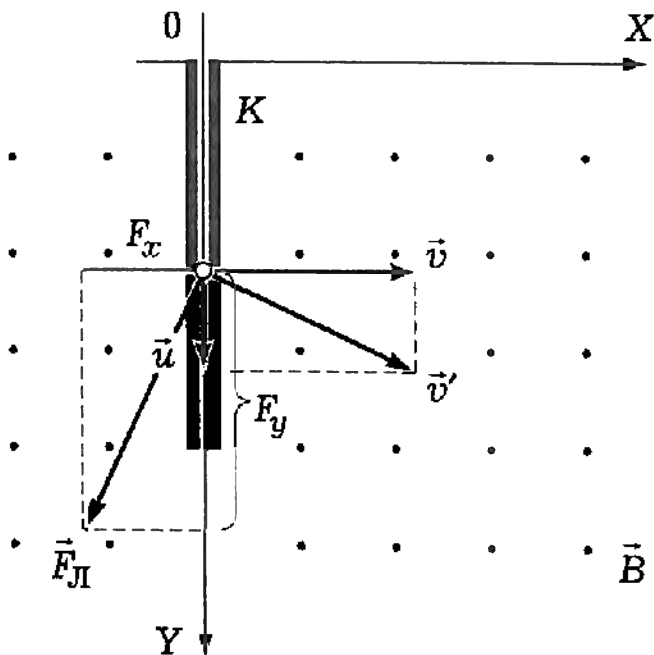


Рис. 245

¹ Предлагаем в этом убедиться самостоятельно.

ца на направление, перпендикулярное проводнику. Это приводит к тому, что перемычка, если ее предоставить самой себе, начнет тормозить и остановится. Для того чтобы ток в цепи не прекращался, на перемычку K должна обязательно действовать внешняя (сторонняя) сила. Работа этой силы и приводит к появлению тока в цепи. Здесь происходит превращение механической энергии в энергию электрическую.

Формуле (2) можно придать другой вид.

Модуль скорости $\vec{v}$ движения проводника, входящий в эту формулу, равен, очевидно, $\frac{x}{\Delta t}$, где x — расстояние, пройденное проводником, и Δt — время, за которое оно пройдено (см. рис. 244). Поэтому формулу (2) можно переписать в виде

$$\mathcal{E} = \frac{Blx}{\Delta t}.$$

Из рисунка 244 видно, что произведение lx — это площадь, пересеченная перемычкой при ее движении, — площадь прямоугольника $bb'c's$. Обозначим ее буквой S . Тогда $S = lx$, и можно записать, что

$$\mathcal{E} = \frac{BS}{\Delta t}. \quad (3)$$

С величиной, определяемой произведением BS , входящей в правую часть этого равенства, мы уже встречались (см. § 94). Эту величину мы называли *магнитным потоком* Φ через площадку:

$$\Phi = BS.$$

Выясним теперь смысл формулы (3). Из рисунка 244 видно, что до смещения перемычки K контур $abcd$, площадь которого мы обозначим через S_0 , пересекал магнитный поток $BS_0 = \Phi_0$. После смещения перемычки в положение $b's'$ магнитный поток через контур стал равен $B(S + S_0)$. Следовательно, он изменился на величину $\Delta\Phi$, равную $\Phi - \Phi_0 = BS + BS_0 - BS_0 = BS$. Таким образом, величина BS в формуле (3) представляет собой *изменение* магнитного потока в результате движения перемычки. Поэтому формулу (3) можно переписать в следующем виде:

$$\mathcal{E} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (4)$$

Как найти направление тока? Пользуясь правилом левой руки, можно найти направление силы Лоренца, действующей на электроны в проводнике, движущемся в магнитном поле, и установить, что в случае, показанном на рисунке 244, конец b проводника K окажется заряженным отрицательно, а конец c — положительно, так что ток в контуре будет течь по часовой стрелке.

Двигатель может стать генератором. В предыдущих параграфах мы видели, что на проводник с током в магнитном поле действует сила, заставляющая его двигаться перпендикулярно линиям индукции, пересекая их. Теперь мы узнали, что, когда проводник без тока движется в магнитном поле, на его концах появляется разность потенциалов, а если проводник замкнуть, то в цепи пойдет ток.

Если через контур, помещенный в магнитном поле, пропускать ток, направление которого изменяется каждые пол-оборота, то такой контур при-

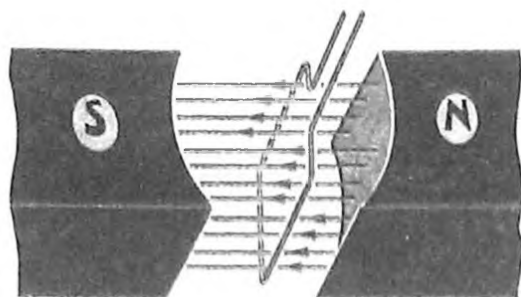


Рис. 246

ходит в непрерывное вращение (см. § 97) и все устройство становится двигателем.

Теперь мы можем понять обратное явление. Оказывается, если контур без тока непрерывно вращают в магнитном поле, то в нем возникает ЭДС, знак которой изменяется на противоположный тоже через каждые пол-оборота. Если контур замкнут, то в нем возникает переменный ток, т. е. ток, направление которого дважды за один оборот контура изменяется. В этом и состоит принцип действия генератора переменного тока.

Простейшая схема такого генератора показана на рисунке 246. При вращении рамки в магнитном поле на ее концах появляется переменная ЭДС.

Электрический двигатель и электрический генератор взаимно обратимы. Если пропускать через обмотку ротора ток, мы получаем двигатель.

Если вращать ротор, то его обмотка становится источником тока.

Для вращения ротора требуется, чтобы какая-то сила совершала работу.

За счет этой механической работы и получается электродвижущая сила.

■ ВОПРОСЫ

1. Какая сила заставляет перемещаться электроны в проводнике, движущемся в магнитном поле?
2. На рисунке 247 показан проводник, движущийся в магнитном поле. Возникает ли на его концах ЭДС?
3. Как связана ЭДС, возникающая на концах движущегося в магнитном поле проводника, с магнитным потоком, пересекаемым проводником?
4. Чем отличается электрический генератор от электрического двигателя?
5. Возникнет ли ток в контуре (см. рис. 244), если в направлении, указанном на рисунке, перемещать не перемычку, а весь контур?

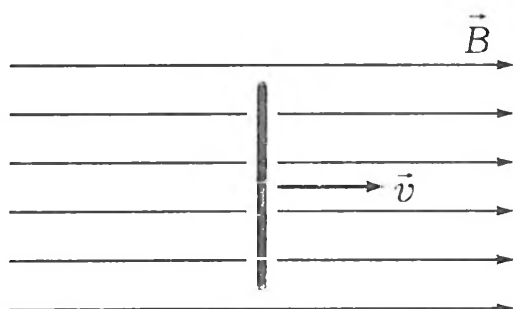


Рис. 247

■ УПРАЖНЕНИЕ 44

1. С какой скоростью должен изменяться магнитный поток, пересекающий незамкнутый кольцевой контур, чтобы на его концах возникло напряжение равное 0,003 В?
2. В цепи (см. рис. 244) длина перемычки равна 10 см, а индукция магнитного поля, в котором находится контур, равна 0,15 Тл. Найдите силу тока в цепи, если перемычка движется равномерно со скоростью 0,5 м/с. Сопротивление перемычки равно 0,1 Ом. Сопротивлением всех прочих частей цепи пренебречь.



Самое важное в девятнадцатой главе

Опыт показывает, что движущиеся электрические заряды, а значит, и проводники с токами взаимодействуют между собой магнитными силами. В частности, два прямолинейных проводника с токами I_1 и I_2 при расстоянии r между ними взаимодействуют так, что на элемент тока одного из них со стороны другого действует сила, модуль которой определяется равенством (закон Ампера)

$$F = k_m \frac{I_1 I_2 \Delta l}{r},$$

где коэффициент $k_m = 2 \cdot 10^{-7} \text{ Н/А}^2$.

Передачиком магнитных взаимодействий является магнитное поле. Характеристикой магнитного поля в каждой его точке служит вектор индукции магнитного поля. Для магнитного поля прямолинейного тока индукция вычисляется по формуле

$$B = k_m \frac{I}{r}.$$

Сила, действующая на элемент тока в магнитном поле, выражается формулой

$$F = BIl \sin \alpha.$$

Важнейшее свойство магнитного поля — замкнутость линий индукции. Линии индукции магнитного поля прямолинейного тока представляют собой окружности, охватывающие ток. Направление вектора индукции определяется правилом правого винта.

Сила, действующая на ток в магнитном поле, всегда перпендикулярна направлению тока и вектору индукции поля. Если линии индукции поля и ток параллельны друг другу, то эта сила равна нулю. Направление силы, действующей на ток в магнитном поле, определяется правилом левой руки.

На замкнутый контур с током в однородном магнитном поле действуют силы, вызывающие его поворот. Вращающий момент этих сил таков, что контур устанавливается в магнитном поле так, чтобы его плоскость была перпендикулярна индукции поля, а индукция магнитного поля самого контура совпадала по направлению с индукцией поля, вызвавшего поворот. Это свойство замкнутых контуров с токами лежит в основе действия электрических двигателей и измерительных приборов.

На заряженные частицы, движущиеся в магнитном поле, действует сила Лоренца, модуль которой равен:

$$F_{\text{л}} = qvB \sin \alpha,$$

где α — угол между векторами скорости частицы и индукции поля. Эта сила равна нулю, когда частица движется вдоль вектора индукции поля. Направление силы Лоренца определяется правилом левой руки.

Проводник, движущийся в магнитном поле, становится источником ЭДС, если направление его движения не параллельно направлению вектора магнитной индукции поля, т. е. если он при движении пересекает линии индукции. Возникающая при этом ЭДС вызвана силами Лоренца, действующими на заряды, движущиеся вместе с проводником, и выражается равенством

$$\mathcal{E} = vBl \sin \alpha.$$

ЭДС может быть выражена также формулой

$$\mathcal{E} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t},$$

где $\Delta\Phi$ — магнитный поток, пересеченный движущимся проводником.

Магнитное поле влияет на вещество,
а вещество — на магнитное поле

Не раз уже указывалось, что магнитное поле действует на помещенные в него магниты так же, как и на замкнутые проводники с токами. С другой стороны, магнитные поля существуют вокруг магнитов так же, как они существуют вокруг электрических токов.

§ 100 Намагничивание тел

В чем причина сходства магнитов и токов? В каждом атоме любого вещества есть электроны, которые как-то движутся в атоме. Движение электронов в атоме очень сложное. Но все же, не делая большой ошибки, мы можем считать, что траектории электронов в атомах замкнуты и поэтому представляют собой маленькие замкнутые токи, своеобразные витки, которые, как и проволочные витки с током, создают магнитные поля. Однако вследствие тепловых беспорядочных движений атомов векторы магнитной индукции этих полей ориентированы совершенно хаотически, так что индукция магнитных полей всех атомов вместе равна нулю.

Но когда какое-нибудь тело помещено в магнитное поле, например в соленоид, по которому течет ток, то плоскости атомных контуров с токами частично поворачиваются так, что векторы индукции их магнитных полей складываются с вектором индукции магнитного поля соленоида, и магнитное поле усиливается. Этот процесс называется *намагничиванием тела*. После выключения тока в соленоиде тепловые движения восстанавливают прежний беспорядок.

Магнитные свойства вещества. Обозначим магнитную индукцию магнитного поля соленоида через $\vec{B}_0$, а индукцию поля, возникшего благодаря намагничиванию тела, помещенного в катушку, через $\vec{B}_1$. Тогда общая индукция поля $\vec{B}$ равна:

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_1.$$

Отношение модуля общей индукции $\vec{B}$ к модулю индукции поля самого соленоида $\vec{B}_0$ называется *магнитной проницаемостью* вещества. Обозначают эту величину буквой μ , так что

$$\mu = \frac{B}{B_0} = \frac{|\vec{B}_0 + \vec{B}_1|}{B_0}.$$

Опыты показывают, что большинство намагничиваемых образцов, помещаемых в соленоид, усиливает его поле (в μ раз), так что магнитная проницаемость μ у них больше единицы. Вещества с магнитной проницаемостью, большей единицы, называются *парамагнитными* веществами.

Есть и такие вещества, которые не усиливают поле соленоида, а ослабляют. У них $\mu < 1$. Такие вещества называют *диамагнитными*. Стержень

из такого вещества, например, не будет втягиваться в магнитное поле магнита, а, наоборот, выталкивается из него.

И у диамагнитных, и у парамагнитных веществ магнитная проницаемость, однако, очень мало отличается от единицы, так что увеличение и уменьшение индукции магнитного поля соленоида, в который их помещают, настолько незначительны, что не могут иметь практического значения. Те магнитные стрелки, постоянные магниты, сердечники, о которых не раз упоминалось, изготавливаются не из парамагнитных и, конечно, не из диамагнитных веществ.

Существует, однако, довольно большая группа удивительных по своим магнитным свойствам материалов, называемых *ферромагнитными*. Из них-то и делают магнитные стрелки, постоянные магниты всевозможных форм и назначений, сердечники для электромагнитных приборов и устройств. Без них не обходятся многочисленные машины и аппараты, составляющие основу современной техники.

■ ВОПРОСЫ

1. В чем состоит процесс намагничивания тел? 2. Что такое магнитная проницаемость? 3. Чем отличаются парамагнитные вещества от диамагнитных? 4. Почему магнитные стрелки не изготавливают из парамагнитных веществ?

§ 101 Ферромагнитные вещества

К ферромагнитным веществам относятся четыре химических элемента — железо, кобальт, никель и гадолиний, а также большое число различных сплавов и химических соединений.

Отличительное свойство ферромагнетиков — очень большая магнитная проницаемость μ . Она может достигать значений в сотни тысяч. Кроме того, ферромагнетики обладают уникальной способностью сохранять намагниченное состояние и после того, как намагничивающее поле выключено. Поэтому из ферромагнитных веществ можно изготавливать постоянные магниты.

Почему ферромагнетики так сильно отличаются от других веществ?

Те маленькие круговые «токи» в виде замкнутых электронных орбит, о которых мы упоминали выше, к ферромагнетизму отношения не имеют. Здесь играет роль то, что каждый электрон сам ведет себя как маленький магнетик, способный ориентироваться в магнитном поле.

Электроны ориентируются сами собой. В любом ферромагнетике, оказывается, существуют небольшие области (размером около сотой доли миллиметра), в которых электроны-магнетики сами собой (как говорят, спонтанно), без внешнего магнитного поля располагаются параллельно друг другу. Каждая из таких областей (они называются доменами), следовательно, намагничена и представляет собой магнит. Но различные домены ориентированы беспорядочно. В этом беспорядке «виновато», как всегда, тепловое движение, которое не может нарушать порядок внутри доменов, но успешно наводит беспорядок между ними. Это показано на рисунке 248, на котором электроны-магнетики изображены стрелочками. В результате ферромагне-

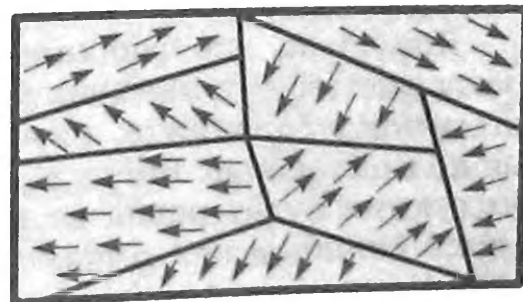


Рис. 248

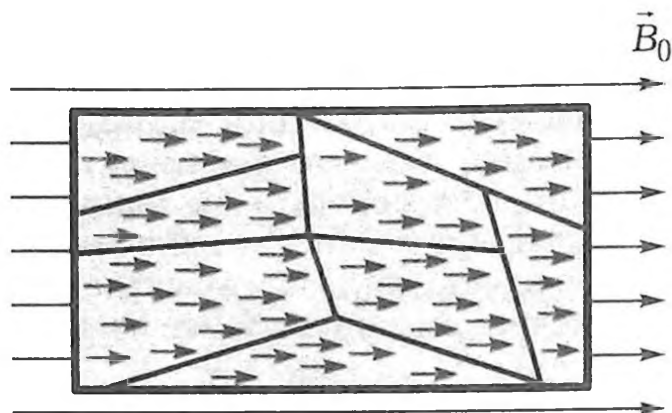


Рис. 249

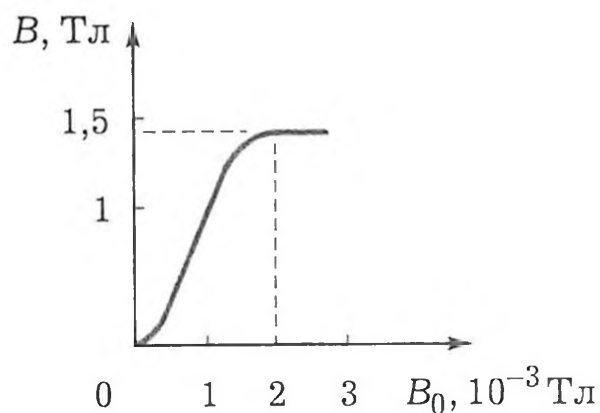


Рис. 250

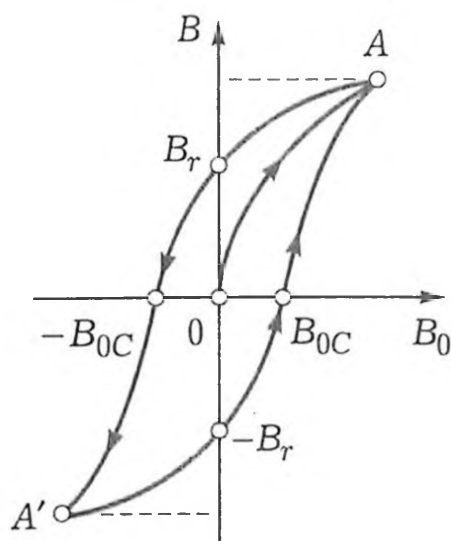


Рис. 251

тик в целом магнитом не является, хотя и состоит из множества намагниченных частей.

Ферромагнетик намагничивается. Если ферромагнетик поместить во внешнее магнитное поле, например в соленоид с током, то уже при сравнительно малом значении индукции поля векторы магнитной индукции всех доменов «выстраиваются» вдоль внешнего поля (рис. 249). На рисунке 250 показано, как изменяется индукция поля B (катушки и ферромагнетика вместе) с изменением B_0 . График этот относится к стали. Из графика видно, что достаточно довести индукцию B_0 до значения всего около $2 \cdot 10^{-3}$ Тл, чтобы индукция B достигла значения около 1,5 Тл. Индукция, значит, увеличивается почти в 1000 раз. Дальше она почти не растет, потому что векторы индукции магнитных полей всех электронов уже установились вдоль направления индукции внешнего поля. Множество доменов как бы объединилось в один-единственный домен, и ферромагнетик, как говорят, намагничен до насыщения. Это одна из особенностей ферромагнетиков: они намагничиваются до насыщения в малых внешних полях. Для сравнения укажем, что парамагнетик намагничивается до насыщения во внешнем поле с индукцией порядка 100—1000 Тл.

Ферромагнетик намагничивается, но не размагничивается! Особенно интересное явление наблюдается, когда намагниченный ферромагнетик размагничивают, т. е. постепенно уменьшают индукцию B_0 намагничи-

вающего поля. То, что при этом происходит, показано на рисунке 251.

Допустим, что ферромагнитный стержень помещен в соленоид, по которому идет ток, и намагничен до насыщения (точка A). Будем теперь уменьшать ток в соленоиде, а вместе с ним и B_0 . Тогда окажется, что график идет не по кривой OA . Когда B_0 станет равной нулю (ток в соленоиде выключен), индукция будет равна не нулю, а какому-то значению B_r . У стержня останется *остаточная индукция*. Стержень можно вынуть из соленоида и использовать как постоянный магнит. Но не будем его извлекать из соленоида, а постараемся размагнитить. Для этого нужно пропускать по соленоиду

ток противоположного направления, который создаст в нем и поле с противоположным направлением вектора магнитной индукции. Увеличивая постепенно (по модулю) индукцию этого поля, мы в конце концов размагнитим стержень, и индукция B станет равной нулю. Это произойдет при значении индукции внешнего магнитного поля, равном $-B_{oc}$. Продолжая увеличивать эту индукцию, мы опять намагнитим стержень до насыщения (точка A'). Уменьшая теперь B_0 до нуля, мы опять получим постоянный магнит, но с индукцией $\vec{B}_r$ противоположного направления. Чтобы вновь размагнитить стержень, нужно снова включить в соленоид ток первоначального направления, и стержень размагнитится, когда индукция B_0 станет равной B_{oc} . Продолжая увеличивать значение B_0 , мы снова придем в точку A , и стержень вновь будет намагничен до насыщения.

Гистерезис. Мы видим, таким образом, что при намагничивании и размагничивании ферромагнетика индукция B как бы отстает от B_0 . Это отставание B от B_0 называется явлением *гистерезиса* (это слово и означает «отставание»). Благодаря этому явлению и получается остаточная индукция. Изображенная на рисунке 251 кривая называется петлей гистерезиса.

Модуль B_{oc} индукции магнитного поля, размагничивающего намагниченный ферромагнетик, называется коэрцитивной силой (хотя это вовсе не сила!). Чем больше B_{oc} , тем труднее размагнитить магнит и тем, значит, он лучше. Для хорошего постоянного магнита нужно еще, чтобы и остаточная индукция B_r была большая.

На рисунке 252 показан общий вид петли гистерезиса двух типов ферромагнетиков. Есть ферромагнетики с узкой петлей гистерезиса (рис. 252, а). У них мала коэрцитивная сила, так что они легко размагничиваются. Такие ферромагнитные материалы называются *магнитомягкими*. Их используют в таких устройствах, где ферромагнетик подвергается частым перемагничиваниям (сердечники генераторов, двигателей, трансформаторов). Магнитомягкими материалами являются чистое железо, у которого коэрцитивная сила около 10^{-4} Тл, пермаллой (сплав из 78% никеля и 22% железа) с коэрцитивной силой $5 \cdot 10^{-6}$ Тл.

У ферромагнетиков с широкой петлей гистерезиса (рис. 252, б) коэрцитивная сила велика. Их называют *магнито жесткими* материалами. Из них делают постоянные магниты. Магнито жестким является, например, сплав, известный под названием «магнико» (сплав железа, никеля, кобальта, алюминия и меди). У него коэрцитивная сила равна 0,07 Тл, а остаточная индукция 1,3 Тл. Еще более сильные постоянные магниты можно изготавливать из сплава SmCo_5 .

Ферромагнетик превращается в парамагнетик. Ферромагнитное вещество остается ферромагнитным только до определенной температуры, называемой *температурой Кюри*. При температуре, большей температуры Кюри, исчезают самопроизвольно

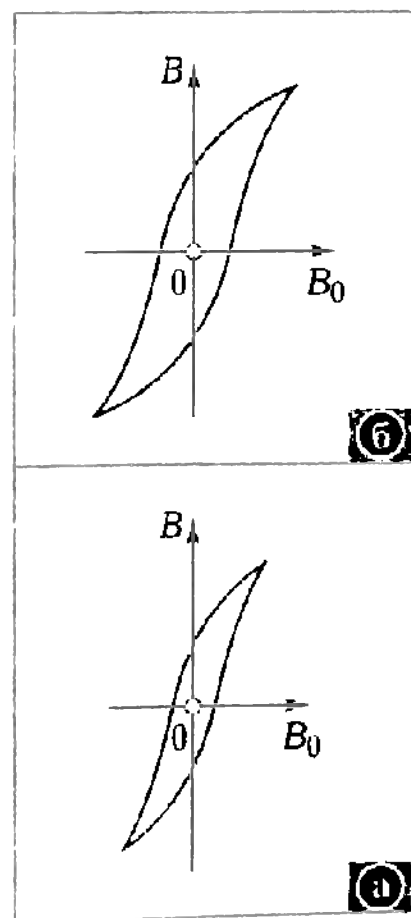


Рис. 252

Для воспроизведения записанного звука используется головка 5 (воспроизводящая головка), устроенная примерно так же, как и записывающая головка. Записывающая головка 2 при этом должна быть отключена.

Когда лента с записанным на магнитном языке звуком проходит мимо электромагнита 5, в его катушке возникает ЭДС¹, значение которой различно для разных участков ленты под полюсами магнита головки, потому что различные участки ленты по-разному намагничены. Эта изменяющаяся ЭДС создает переменный ток в катушке громкоговорителя 6.

Записанный звук можно и стереть. Для этого служит стирающая головка 7. Это тоже электромагнит, в катушку которого подается ток высокой частоты, но сила тока в ней постепенно убывает. Такой постепенно уменьшающийся переменный ток полностью размагничивает намагниченные порошинки, и лента готова к новой записи.

■ ВОПРОСЫ

1. Каковы главные особенности ферромагнитного вещества?
2. Что означают слова «намагничен до насыщения»?
3. В чем состоит явление гистерезиса?
4. Что такое коэрцитивная сила?
5. Чем отличаются магнитомягкие материалы от магнитомягких?
6. Из каких магнитных материалов изготавливают постоянные магниты? сердечники электродвигателей? ленты магнитофонов?

Самое важное в двадцатой главе

В каждом атоме любого вещества имеются электроны, которые движутся по замкнутым орбитам вокруг атома, т. е. представляют собой замкнутые токи. Благодаря этому атомы, подобно замкнутым токам, создают магнитные поля. Из-за тепловых движений атомов векторы индукции созданных ими магнитных полей ориентированы беспорядочно. Но они могут ориентироваться одинаково во внешнем поле, усиливая или уменьшая его. Изменение магнитной индукции внешнего поля характеризуется магнитной проницаемостью вещества, равной

$$\mu = \frac{B}{B_0},$$

где B_0 — модуль индукции внешнего поля, а B — модуль индукции общего поля — внешнего и созданного намагниченным телом.

Вещества, у которых $\mu > 1$, называются парамагнитными, а вещества с $\mu < 1$ называются диамагнитными.

Имеются также вещества с $\mu \gg 1$. Они называются ферромагнитными. Ферромагнитные вещества в отличие от диамагнитных и парамагнитных способны сохранять **намагниченное состояние** после прекращения действия внешнего поля. Из них изготавливают различные постоянные магниты.

¹ ЭДС возникает из-за явления электромагнитной индукции, о котором будет рассказано в курсе физики XI класса.

Проводниками тока могут быть различные среды

Проводниками электрического тока могут быть различные вещества: металлы, растворы электролитов и при определенных условиях газы и даже... вакуум. Широкое применение в последнее время получили некоторые вещества, называемые полупроводниками, которые также при определенных условиях обладают электропроводностью.

Основной закономерностью для тока в любом проводнике служит зависимость силы тока от приложенного напряжения. График этой зависимости называется вольт-амперной характеристикой данного проводника.

Как мы уже говорили, для создания тока в какой-либо среде необходимо, чтобы в ней имелись заряженные частицы, способные перемещаться под действием электрического поля. Этими частицами могут быть как электроны, так и ионы. Выяснить природу тока — это значит установить, какие именно заряженные частицы переносят заряд в данной среде.

В этой главе мы рассмотрим природу и закономерности электрического тока в различных средах.

§ 103

Элементы электронной теории
проводимости металлов

Природа электрического тока в металлах. В металлах почти все атомы ионизованы, т. е. от них отделились электроны, которые беспорядочно движутся в промежутках между ионами, а сами ионы совершают колебания в узлах кристаллической решетки. Естественно предположить, что эти оторвавшиеся от атомов электроны, называемые *электронами проводимости*, и являются свободными носителями заряда в металлах.

«Электронный газ» в металле. Концентрация электронов проводимости в металле n очень велика — по порядку величины она равна числу атомов в единичном объеме металла. Этим объясняется хорошая электропроводность металлов.

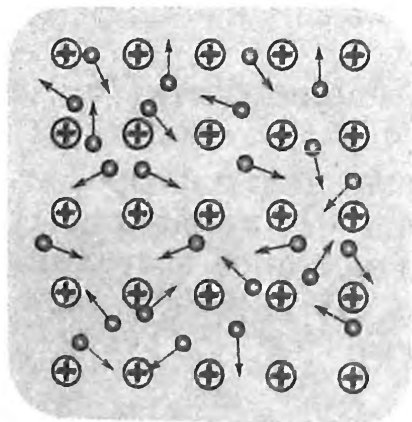


Рис. 254

Электроны в металлах находятся в непрерывном движении. Их беспорядочное движение (рис. 254) 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 в одном направлении — противоположном направлению вектора напряженно-

сти поля. Поэтому в электрическом поле беспорядочно движущиеся электроны смещаются в одном направлении, т. е. движутся упорядочено.

Упорядоченное перемещение электронов проводимости и представляет собой *электрический ток в металлах*.

Движение электронов похоже на дрейф льдин во время ледохода, когда они, двигаясь беспорядочно и сталкиваясь друг с другом, дрейфуют по течению реки.

Взаимодействуя (как бы сталкиваясь) с колеблющимися в узлах кристаллической решетки ионами, электроны отдают им свою энергию. А увеличение энергии ионов означает повышение температуры проводника. Вот почему при прохождении тока проводники нагреваются. Двигаясь между столкновениями с ионами, электроны ускоряются электрическим полем и опять приобретают кинетическую энергию благодаря работе, которую совершает электрическое поле.

Связь силы тока со скоростью движения заряженных частиц. В § 35 мы получили формулу для числа частиц, попадающих в единицу времени на некоторую площадку на их пути: $Z = \frac{1}{2} nS |\bar{v}_x|$. Формула эта относилась к беспорядочно движущимся молекулам газа. Ее можно применить и к движущимся заряженным частицам в проводнике, если отбросить множитель $1/2$, поскольку все заряженные частицы в проводнике движутся упорядоченно. Площадкой мы здесь будем считать поперечное сечение проводника. Таким образом, сечение проводника в единицу времени пересекают $nS\bar{v}$ частиц. Если электрический заряд каждой из них равен q_0 , то через сечение проводника в единицу времени проходит заряд, равный $q_0 nS\bar{v}$. Но заряд, протекающий в единицу времени через сечение проводника, — это сила тока I , так что

$$\boxed{I = q_0 nS\bar{v}}, \quad \text{или } I = enS\bar{v}, \quad (1)$$

так как для металла q_0 равно заряду электрона e .

Напомним, что в этой формуле n — это число частиц в единице объема (концентрация), S — площадь поперечного сечения проводника и $\bar{v}$ — средняя скорость упорядоченного движения частиц. За направление тока, о котором мы часто говорили, принимают направление скорости движения положительно заряженных частиц. Если в проводнике движутся отрицательно заряженные частицы, то направление тока противоположно направлению их скорости.

Используя формулу (1), рассчитаем среднюю скорость упорядоченного движения электронов, например, в медном проводнике сечением 1 мм^2 при силе тока 10 А :

$$\bar{v} = \frac{1}{neS}.$$

Для большинства металлов концентрация электронов проводимости находится в пределах $10^{28} - 10^{29} \text{ м}^{-3}$. В частности, для меди она равна $n = 9 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$. Поэтому для меди получаем:

$$\bar{v} = \frac{10 \text{ А}}{9 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 10^{-6} \text{ м}^2} \approx 7 \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Мы видим, что эта скорость 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

$$t = \frac{5 \text{ м}}{7 \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}}{\text{с}}} \approx 7000 \text{ с.}$$

т. е. 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. 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 вовлекает в упорядоченное движение почти мгновенно электроны, находящиеся в различных точках проводника, даже очень удаленных друг от друга. Электрическое поле распространяется со скоростью $\approx 300\,000 \text{ км/с}$, т. е. со скоростью света. Эту скорость и имеют в виду, когда говорят о скорости распространения поля. 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 начинают действовать одновременно?

■ УПРАЖНЕНИЕ 45

1. На какое расстояние переместятся электроны по медному проводнику сечением 4 мм^2 при силе тока 10 А за время 5 с ? На какое расстояние распространился бы ток за это время? Концентрацию свободных электронов в меди считать равной $9 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$.
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.

§ 104 Экспериментальное подтверждение электронной проводимости металлов

Прямое и убедительное доказательство справедливости предположения об электронной проводимости металлов представляют собой опыты, поставленные в 1913 г. русскими физиками Л. И. Мандельштамом и Н. Д. Папалекси и в 1916 г. английскими физиками Р. Толменом и Б. Стюартом.

В основе этих опытов лежит предположение о том, что, кроме электронов, связанных с ядром атома, в металлах имеются и 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 от-

носителем проводника и, следовательно, в нем должен возникнуть кратковременный ток. Кратковременное движение электронов в проводнике в этом случае подобно отклонению пассажиров автобуса по направлению его движения при резком торможении.

Опыт по обнаружению инерционного движения электронов в металле заключается в следующем.

На катушку наматывают проволоку, концы которой припаивают к двум металлическим дискам, изолированным друг от друга (рис. 255). К концам дисков при помощи скользящих контактов присоединяют гальванометр. Катушку приводят в быстрое вращение, а затем внезапно 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.

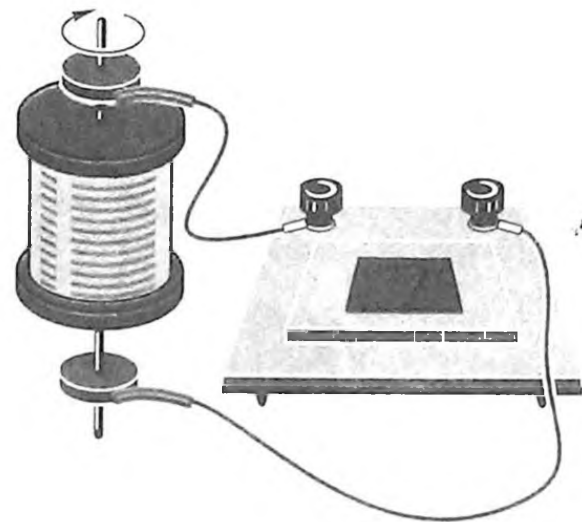


Рис. 255

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). Рассмотрим, как это было сделано.

После мгновенной остановки катушки свободные носители заряда будут двигаться по инерции со скоростью v , которую имели витки катушки до торможения. Сталкиваясь с ионами кристаллической решетки, электроны останавливаются. В результате этого кинетическая энергия электронов $\frac{mv^2}{2}$, которой они обладали до торможения, будет израсходована на нагревание проводника.

Если в проводнике имеется N свободных носителей заряда, то они обладают кинетической энергией, равной $N \frac{mv^2}{2}$. Эта кинетическая энергия равна количеству теплоты, которое выделится в проводнике ($Q = I^2 Rt$):

$$N \frac{mv^2}{2} = I^2 Rt. \quad (1)$$

Число свободных носителей заряда в проводнике длиной l и площадью сечения S можно выразить через концентрацию электронов в проводнике n и объем проводника $V = lS$:

$$N = nV = nlS.$$

Силу тока можно вычислить по формуле

$$I = q_0 n \bar{v} S, \quad (2)$$

где $\bar{v}$ — средняя скорость упорядоченного движения заряженных частиц. Так как скорость частиц при торможении проводника изменяется от v до нуля, то их средняя скорость в этом движении равна $\bar{v} = \frac{v}{2}$.

Подставляя это значение для $\bar{v}$ в формулу (2), получаем для силы тока выражение

$$I = q_0 \frac{v}{2} nS.$$

Если выражения для силы тока и числа электронов подставить в формулу (1), то получим следующее равенство:

$$nSl \frac{mv^2}{2} = q_0 n \frac{v}{2} SIRt,$$

откуда

$$\frac{q_0}{m} = \frac{vl}{RIt}, \quad (3)$$

где $It = q$ — количество электричества, протекшего через гальванометр, а R — сопротивление всей цепи — катушки, соединительных проводов и гальванометра. Все величины, стоящие в формуле (3) справа, можно измерить. Гальванометр предварительно градуируется так, что по отбросу его стрелки можно судить о заряде, прошедшем через него¹. На основании данных этого опыта было получено значение отношения заряда носителя к его массе. Эта величина оказалась близкой к значению отношения заряда электрона к его массе, полученному из опытов, выполненных другими методами.

Так, было установлено, что носителями свободных зарядов в металле являются электроны.

Измерения, выполненные в настоящее время, для модуля отношения заряда электрона (e) к его массе (m) дают следующее значение:

$$\frac{e}{m} \approx 1,8 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг.}$$

На основании опытов, выполненных А. Ф. Иоффе и Р. Милликеном, было получено, что модуль заряда электрона равен $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Это позволило вычислить и массу электрона, она оказалась равной $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг. Масса электрона очень мала, она в 1836 раз меньше массы самого легкого атома — атома водорода.

§ 105 Особенности электрического тока в металлах

Вольт-амперная характеристика металлов. Зависимость силы тока от напряжения для металлических проводников была изучена в курсе физики VIII класса. Эта зависимость выражается законом Ома для участка

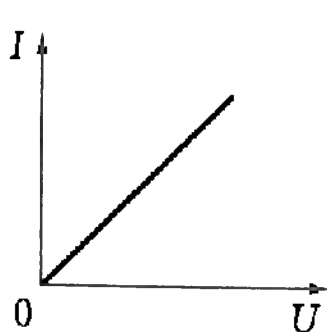


Рис. 256

цепи: $I = \frac{U}{R}$. Из закона Ома следует, что при постоянном сопротивлении сила тока прямо пропорциональна напряжению. Следовательно, вольт-амперная характеристика для металлического проводника представляет собой прямую линию, проходящую через начало координат (рис. 256). Угол наклона этой линии к оси напряжений зависит от сопротивления проводника.

¹ Градуировка гальванометра производится при помощи конденсатора известной емкости, накопившего заряд от источника с известным напряжением ($q = CU$).

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. При повышении температуры проводника размах колебаний ионов возрастает и число соударений электронов с ионами увеличивается. Поэтому можно ожидать, что 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. 257). Последовательно с ней включим лампу, по свечению которой можно судить об изменении силы тока в цепи.

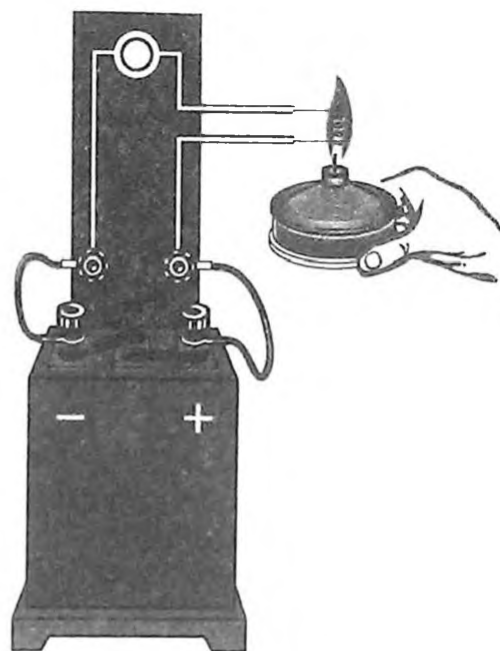


Рис. 257

Нагревая спираль при помощи горелки, мы увидим, что ток в цепи заметно уменьшается. Следовательно, 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 пропорционально их температуре.

Каждое вещество можно характеризовать постоянной для него величиной, называемой *температурным коэффициентом сопротивления* α . Этот коэффициент показывает относительное изменение удельного сопротивления проводника при его нагревании на 1 К:

$$\alpha = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0 \Delta T},$$

где ρ_0 — удельное сопротивление при температуре $T_0 = 273 \text{ К}$ (0°C), а ρ — удельное сопротивление при данной температуре T . Отсюда зависимость удельного сопротивления металлического проводника от температуры выражается формулой

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha \Delta T). \quad (1)$$

Как известно, $R = \rho \frac{l}{S}$. Поэтому формулу (1) можно записать в виде

$$R = R_0 (1 + \alpha T), \quad (2)$$

где $R_0 = \rho_0 \frac{l}{S}$.

Графически зависимость удельного сопротивления металлических проводников от температуры представлена на рисунке 258. Как видно из рисунка, линия графика наклонена под малым углом к оси абсцисс. Это означает, что с повышением температуры сопротивление метал-

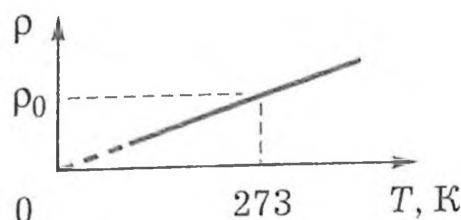


Рис. 258

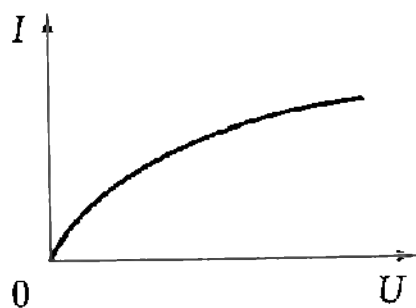


Рис. 259

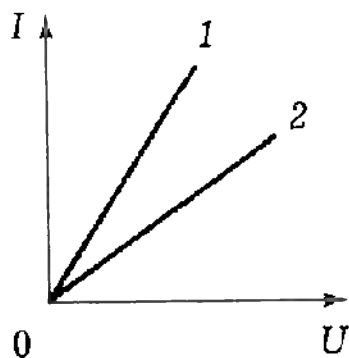


Рис. 260

лов растет сравнительно медленно. Существуют специальные сплавы, сопротивление которых практически не изменяется при нагревании. Таковы, например, сплавы константан и манганин.

Изменение сопротивления проводников при изменении температуры приводит к тому, что их вольт-амперная характеристика отличается от прямой линии. Это особенно заметно в тех случаях, когда температура проводников значительно изменяется, например при нагревании нити осветительной лампы. На рисунке 259 приведена вольт-амперная характеристика такой нити. Как видно из рисунка, сила тока в этом случае не прямо пропорциональна напряжению.

Не следует думать, что этот вывод противоречит закону Ома для участка цепи. Напомним, что зависимость, сформулированная в законе Ома, справедлива только при постоянном сопротивлении данного участка цепи.

■ ВОПРОСЫ

1. От чего зависит угол наклона вольт-амперной характеристики проводника?
2. В чем причина зависимости сопротивления проводников от температуры?
3. При включении электрической лампы сила тока в первый момент значительно отличается от силы тока в лампе, когда она начинает светиться. Объясните причину этого явления.
4. На рисунке 260 даны вольт-амперные характеристики двух проводников (1 и 2). У какого из них сопротивление больше?

§ 106 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 постепенном охлаждении, он обнаружил, что при температуре 4,12 К сопротивление ртути скачком падало до нуля (рис. 261). Он же обнаружил, что то же самое происходит со свинцом при температуре 7,12 К, с оловом при температуре 3,7 К. В дальнейшем было выяснено, что более 25 химических элементов — металлов при очень низких температурах становятся проводниками, лишенными электрического сопротивления. У каждого из них своя критическая температура T_c перехода в

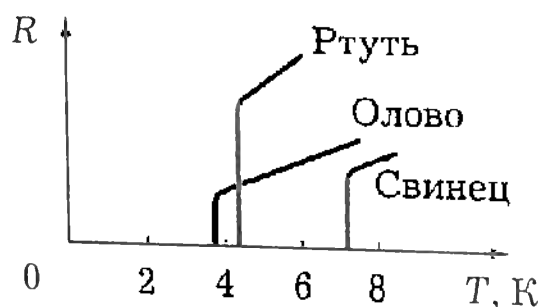


Рис. 261

состояние с нулевым сопротивлением. Самое низкое значение T_c у вольфрама — 0,012 К, самое высокое — у ниобия — 9 К. Интересно, что самые лучшие проводники — серебро и медь не теряют сопротивления ни при каких температурах.

Свойство проводников терять при температуре ниже определенной свое сопротивление, а также явление, состоящее в такой потере, называется *сверхпроводимостью*. Проводники с таким свойством называются *сверхпроводниками*.

Если в сверхпроводящей цепи, например в кольце, изготовленном из сверхпроводника и охлажденном до температуры ниже его T_c , каким-нибудь образом создать электрический ток, то он без всякого источника будет продолжаться сколь угодно долго. Электроны, движущиеся в сверхпроводнике, не передают своей энергии ионам, и она не тратится на нагрев. В специально поставленном опыте незатухающий ток наблюдался более двух лет. Ток, однако, тотчас же исчезает, как только температура проводника повышается до T_c .

Сверхпроводимость и магнетизм. Необычны не только электрические свойства сверхпроводников, но и их магнитные свойства. В главе 20 упоминалось о том, что существуют вещества, называемые диамагнетиками. Если диамагнетик поместить в магнитное поле, то он, в отличие от парамагнитных и ферромагнитных веществ, намагничивается так, что магнитное поле в нем не усиливается, а ослабляется, хотя и очень незначительно. А вот любой сверхпроводник — это идеальный диамагнетик. Идеальный в том смысле, что когда он помещен в магнитное поле, то в нем самом поле полностью исчезает (сверхпроводник оказывается еще и «сверхдиамагнетиком»). Сверхпроводимость как бы несовместима с магнетизмом. «Несовместимость» эта проявляется и в том, что при определенном для каждого сверхпроводника значении магнитной индукции сверхпроводимость внезапно исчезает и проводник становится нормальным, даже если его температура ниже T_c . Важно, что разрушает сверхпроводимость не только внешнее магнитное поле, но и магнитное поле электрического тока в самом сверхпроводнике. У сверхпроводников — чистых металлов индукция магнитного поля, разрушающего сверхпроводимость, невелика — десятые и сотые доли тесла. Это значит, что в таких сверхпроводниках не могут существовать сильные токи: электрический ток своим магнитным полем сам себя «выключает».

Известны, однако, сверхпроводники с несколько иными свойствами. Это сплавы и соединения, а не чистые металлы. У некоторых из них более высокие критические температуры T_c . Например, у соединения Nb_3Ge $T_c = 23,2$ К, у Nb_3Sn — 18,1 К и т. д. Но особенно важно, что критические индукции магнитных полей для них в тысячи раз больше, чем для чистых металлов. В цепи из таких сверхпроводников можно «загонять» огромные токи, не рискуя разрушить сверхпроводимость.

О применении сверхпроводимости. Наиболее важным для техники было бы создание линий передачи электрической энергии из сверхпроводящих проводов. Это устранило бы большие потери энергии на нагрев. Можно было бы строить меньше новых электростанций, загрязняющих окружающую среду. Энергия стала бы **более дешевой**.

В электрических машинах (генераторах, двигателях) сверхпроводники позволили бы отказаться от железных сердечников, **из-за** которых машины так громоздки. Ведь железо в машинах служит для создания сильных

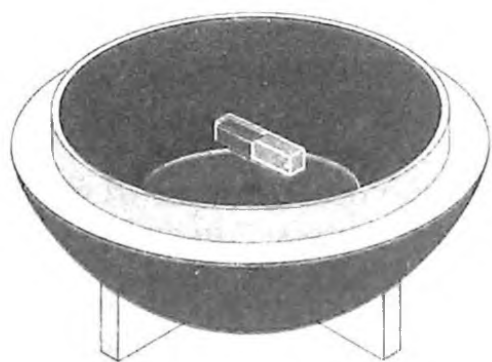


Рис. 262

магнитных полей. Электрическими токами в сверхпроводящих соленоидах можно создать более сильные поля и притом без тепловых потерь. Машины стали бы легкими, экономичными, компактными.

Но ни линий электропередачи из сверхпроводящих проводов, ни электрических машин без железа пока нет. Нет потому, что провода нужно охлаждать до сверхнизких температур. К тому же такие материалы, как Nb_3Sn , трудно превратить в гибкие, пригодные для на-

матывания соленоидов, проволоки, тем не менее сверхпроводящие материалы успешно используются для создания, пока для исследовательских целей, соленоидов, в которых можно получать магнитные поля с индукцией в десятки и даже сотни тесла. Такие соленоиды применяются в опытах по осуществлению термоядерных реакций для получения энергии. Здесь нужны магнитные поля с индукцией до 10 Тл.

Успешно используются сверхпроводники во многих устройствах малых масштабов. Из них изготавливают элементы ЭВМ, переключатели, измерительные приборы высокой чувствительности и др.

Еще одно возможное применение сверхпроводников связано с их «сверхдиамагнитностью». Диамагнетик, как указывалось в главе 20, не втягивается в магнитное поле, а выталкивается из него. Правда, выталкиваться из поля может и ферромагнетик. Например, магнит выталкивается из поля другого магнита, если оба магнита «смотрят» друг на друга одноименными полюсами. Но разница в том, что ферромагнетик после выталкивания из магнитного поля не может находиться в состоянии устойчивого равновесия. Сверхпроводник же — идеальный диамагнетик — остается после выталкивания из поля в равновесии, как бы паря в поле. Верно и обратное: если приблизить магнит к сверхпроводнику, то парить будет магнит. Именно такой эффектный опыт поставил еще в 1945 г. профессор Московского университета В. К. Аркадьев. К свинцовой чаше, охлажденной жидким гелием, он приблизил постоянный магнит, и тот повис на некоторой высоте над ней (рис. 262).

Такое «парение» магнита над сверхпроводником (или, наоборот, сверхпроводника над магнитом) называется *левитацией*. Это явление может быть использовано (и используется) для устройства подшипников без трения, магнитных подвесов и т. д. Его в принципе можно использовать в грандиозном масштабе — для создания поездов на «магнитной подушке», которые смогут двигаться с огромными скоростями, не касаясь дорожного полотна.

Высокотемпературная сверхпроводимость. В самое последнее время появилась надежда на то, что те технические применения сверхпроводников, о которых здесь упоминалось, могут стать реальностью. Начиная с 1987 г. стали появляться сообщения о создании совершенно новых материалов, у которых температура перехода в сверхпроводящее состояние (T_c) лежит в области 70—120 К. Охлаждение до таких температур достигается с помощью дешевого и безопасного жидкого азота, который кипит при 77 К. Любопытно, что новые сверхпроводники — это сложные керамические системы, например, такие: $Bi - Ca - Sr - CuO_4$,

Bi — Ba — K — CuO₄ и многие другие. Пока эти материалы еще не вполне пригодны для уверенного применения в технике: они хрупки, из них трудно сделать гибкие проволоки и т. д. Но важно то, что удалось преодолеть «холодный барьер» и, возможно, в будущем удастся создать материалы с еще более высокой T_c , а может быть, и с T_c выше комнатной температуры.

§ 107 Электрические свойства полупроводников

Долгое время считалось, что все окружающие нас вещества по своей электропроводности делятся на две категории: проводники и диэлектрики (изоляторы). Экспериментально было установлено, что резкой границы между этими группами провести нельзя. Очень многие вещества по их электрическим свойствам нельзя отнести ни к проводникам, ни к изоляторам, и в то же время они обладают в какой-то мере свойствами и тех и других. По своему удельному сопротивлению эти вещества занимают промежуточное положение. Такие вещества получили название полупроводников.

Удельное сопротивление типичных проводников имеет значение 10^{-8} — 10^{-6} Ом · м, удельное сопротивление диэлектриков 10^{10} — 10^{16} Ом · 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; их масса составляет примерно 4/5 массы земной коры. Это ряд элементов (германий, кремний, бор и др.), большинство минералов, различные оксиды, сульфиды, теллуриды и другие химические соединения.

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 полупроводник в цепь, содержащую аккумулятор и гальванометр (рис. 263). Мы увидим, что стрелка гальванометра отклоняется незначительно, т. е. сила тока в цепи мала. Значит, полупроводник при комнатной температуре имеет большое сопротивление.

Нагревая полупроводник вначале просто рукой, мы заметим, что стрелка отклоняется на больший угол, а при нагревании полупроводника с помощью электрической плитки стрелка отклоняется почти на всю шкалу гальванометра. Это показывает, что при нагревании удельное сопротивление полупроводника значительно уменьшается. Если же охладить полупроводник, например опустив его в стакан с холодной водой, сопротивление полупроводника увели-

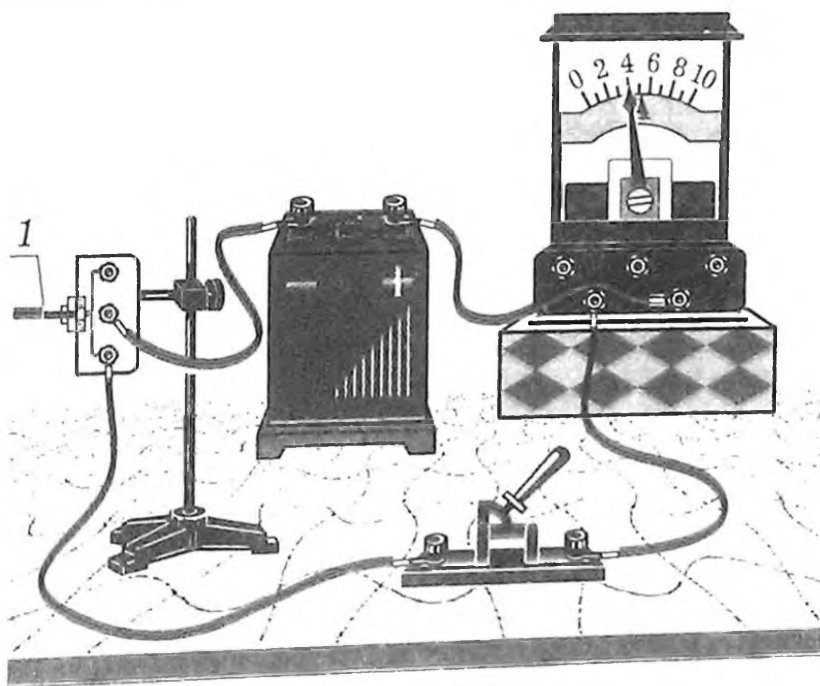


Рис. 263

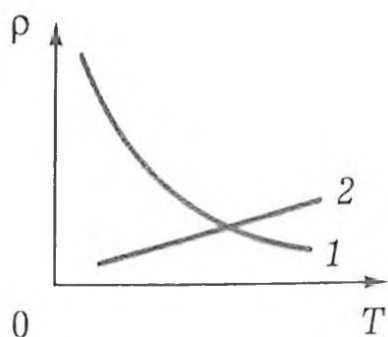


Рис. 264

чится. При температуре, близкой к абсолютному нулю, многие полупроводники являются диэлектриками.

На рисунке 264 изображен график зависимости удельного сопротивления полупроводника от температуры (кривая 1). Для сравнения на том же рисунке дан график (2) этой зависимости для металлического проводника. Как видно из графиков, температурный коэффициент сопротивления полупроводников в отличие от металлов отрицательный, а по абсолютному

значению он значительно больше, чем у металлов.

Из полупроводниковых материалов, удельное сопротивление которых особенно резко изменяется с изменением температуры, изготавливают терморезисторы или термисторы. Ими пользуются для измерения температуры, а также как чувствительными элементами (датчиками), реагирующими на изменения температуры в автоматических устройствах.

Сопротивление полупроводников уменьшается также под действием освещения, причем у некоторых весьма значительно. Это явление получило название фотопроводимости. Из таких полупроводников делают фоторезисторы, которые применяются для управления током в цепи изменением освещения.

Заменим термистор в описанном выше опыте фоторезистором 1 (рис. 265), который в начале опыта закрыт непрозрачным экраном. Убрав экран, по отклонению стрелки мы убедимся, что освещение вызывает значительное уменьшение сопротивления фоторезистора.

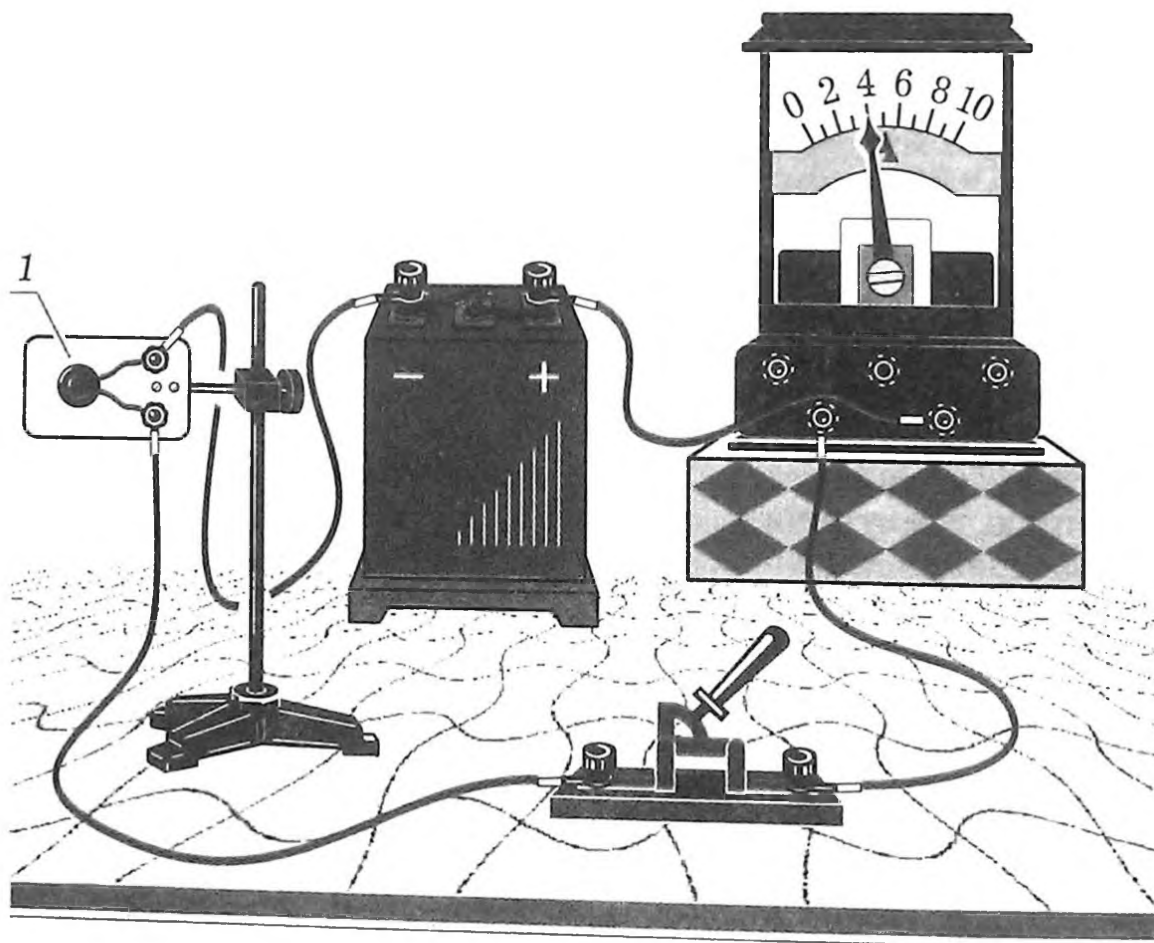


Рис. 265

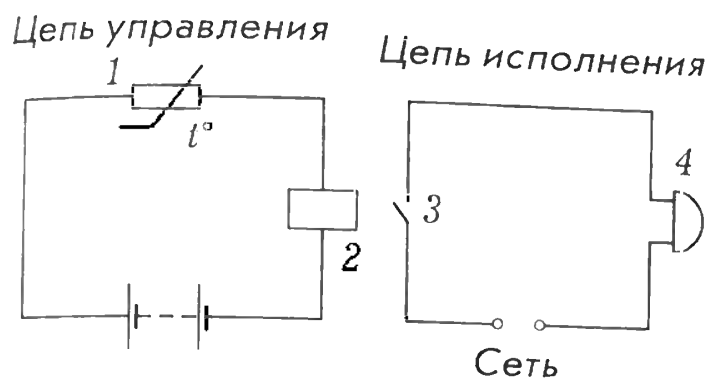


Рис. 266

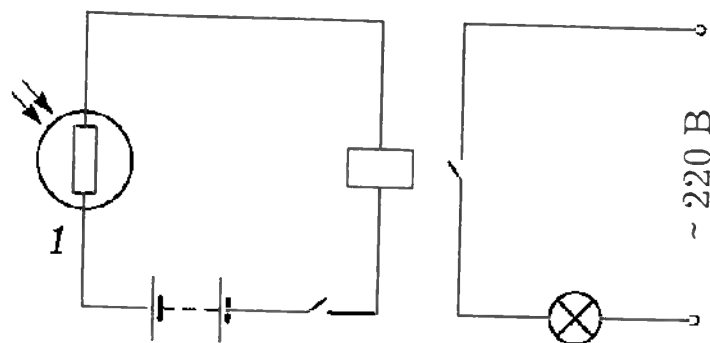


Рис. 267

Итак, удельное сопротивление полупроводников резко уменьшается при их нагревании или освещении. Это позволяет использовать полупроводники в различных автоматических устройствах.

Рассмотрим, например, как работает простейшее полупроводниковое термореле, схема которого приведена на рисунке 266. Это реле может быть использовано, в частности, для сигнализации о том, что в электропечи достигнута заданная температура.

Когда температура в печи, в которую помещают термистор 1, низка, по цепи проходит слабый ток, недостаточный для срабатывания электромагнитного реле 2. Когда температура в печи 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.

■ ВОПРОСЫ

1. Сравните зависимость удельного сопротивления от температуры для металлов и полупроводников. 2. На рисунке 267 приведена схема простейшего фотореле. Фоторезистор обозначен цифрой 1. Объясните действие фотореле.

§ 108 Природа электрического тока в полупроводниках

Экспериментально установлено, что прохождение электрического тока по полупроводникам 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 опыты, рассмотренные в предыдущем параграфе, показывают, что между полупроводниками и металлами имеется глубокое различие. В чем причина различия свойств полупроводников и металлов?

Мы уже говорили о том, что атомы металлов имеют электроны, которые сравнительно слабо связаны с ними. Это валентные электроны, которые находятся на внешних электронных оболочках. Валентные электроны легко отделяются от атомов и образуют электронный газ, концентрация которого очень велика. Эти электроны (электроны проводимости) принадлежат как бы всем атомам и, подобно молекулам в обычном газе, свободно перемещаются по всему проводнику. Именно с этим связана высокая проводимость металлов.

В полупроводниках концентрация электронов проводимости при комнатной температуре **незначительна** — она в **миллиарды раз меньше**, чем у металлов. Поэтому удельное сопротивление полупроводников при низкой тем-

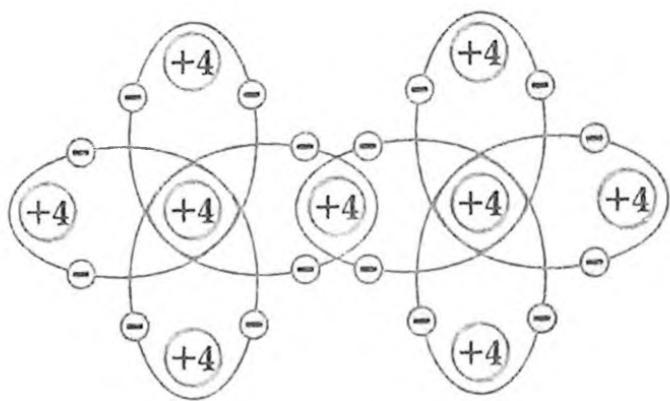


Рис. 268

валентных электрона. Соседние атомы кремния взаимодействуют друг с другом благодаря паре электронов, каждый из которых принадлежал одному из атомов, но стал общим электроном двух атомов при образовании кристалла. Конечно, нельзя изобразить картину движения электронов в кристалле. Схематически на рисунке показано, что каждый электрон как бы связан с двумя атомами, принадлежит двум атомам сразу.

Как известно из курса химии (см. учебник химии для VIII—IX классов), взаимодействие между атомами посредством электронных пар называется ковалентной связью. Для удобства изобразим кристаллическую решетку кремния (рис. 269, а), в которой валентные электроны показаны в виде точек на прямых отрезках, соединяющих соседние атомы.

Электронная проводимость. При температуре, близкой к абсолютному нулю, все валентные электроны прочно связаны с атомами и поэтому не могут быть электронами проводимости. В этих условиях полупроводник — диэлектрик. Но при внешнем воздействии на кристалл — освещении его или нагревании — амплитуда колебаний атомов возрастает. При этом некоторые электроны приобретают энергию, достаточную для того, чтобы покинуть атомы. Такие электроны становятся свободными, или электронами проводимости. Они движутся хаотически, как и свободные электроны в металле, создавая электронную проводимость полупроводников.

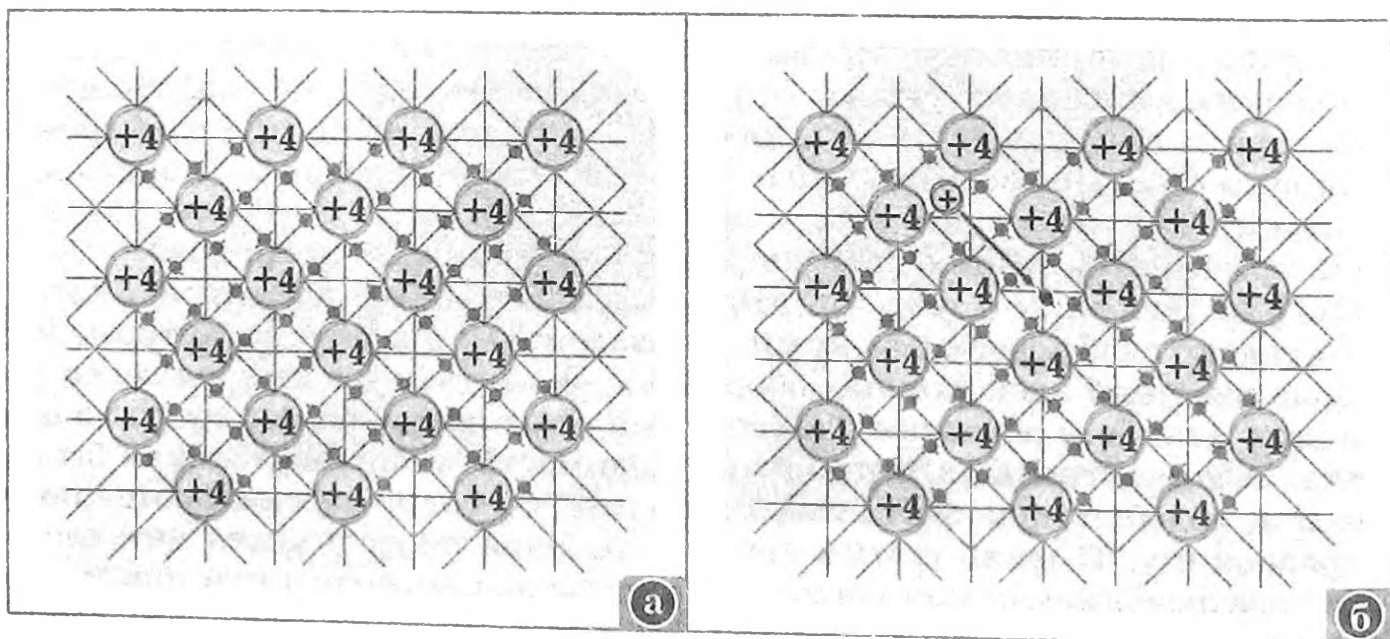


Рис. 269

пературе 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. 268). Атом кремния четырехвалентен. В кристалле кремния каждый атом окружен четырьмя такими же атомами, с которыми его связывают четыре ва-

Дырочная проводимость. В той паре атомов, откуда внешним воздействием электрон был переведен в свободное состояние, появилось вакантное место с недостающим электроном (рис. 269, б). Его называют «дыркой». «Дырку» можно рассматривать как положительно заряженную частицу. 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. Движение «дырки» в кристалле можно проследить по рисунку 270, а, б, в, г. При создании в полупроводнике электрического поля «дырки» движутся преимущественно в том направлении, куда двигались бы положительные заряды, а электроны — в противоположном направлении. На этом рисунке направления «перескоков» валентных электронов указаны стрелками.

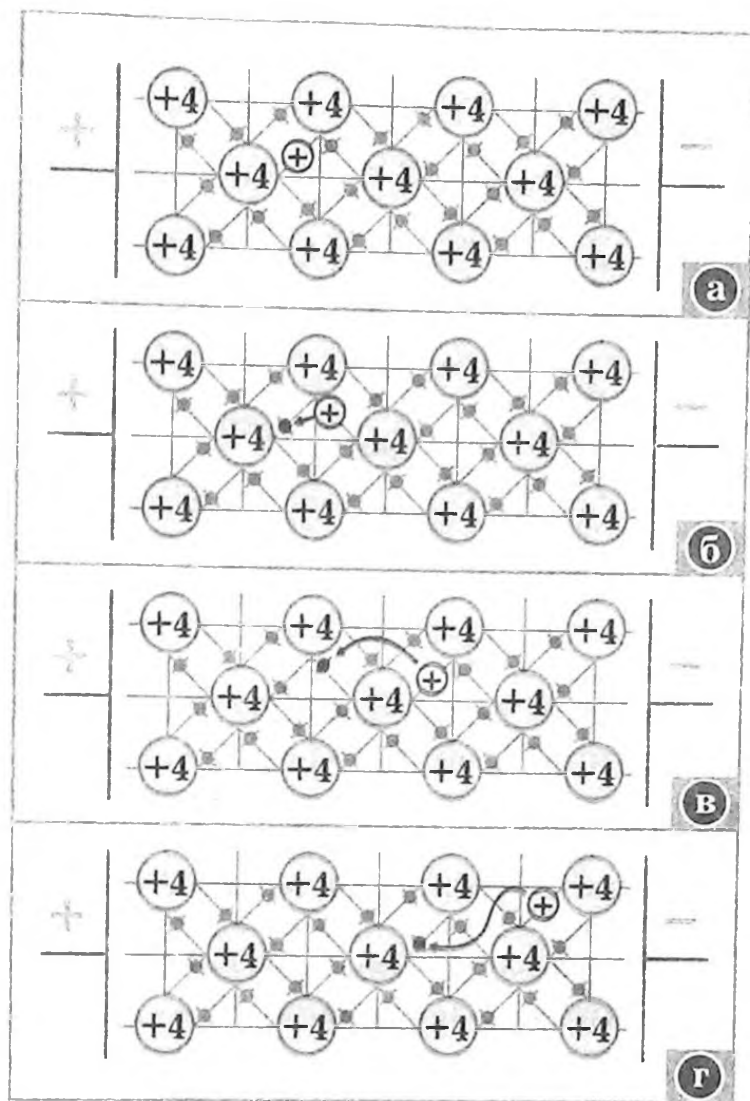


Рис. 270

Итак, электрический ток в полупроводнике создается электронами проводимости и «дырками». 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», называется *собственной* проводимостью полупроводников.

При повышении температуры полупроводника число электронов проводимости, а следовательно, и число «дырок» возрастает. Этим и объясняется уменьшение сопротивления полупроводника от температуры.

■ ВОПРОСЫ

1. Как возникает электронная и «дырочная» проводимость полупроводника? 2. Что называется собственной проводимостью полупроводников? 3. Почему уменьшается удельное сопротивление полупроводников с повышением температуры?

§ 109 Примесная проводимость полупроводников

Сопротивление полупроводников зависит не только от внешних воздействий. Оно существенно зависит от наличия в них примесей. При введении незначительного количества соответствующей примеси удельное сопротивление полупроводников резко уменьшается.

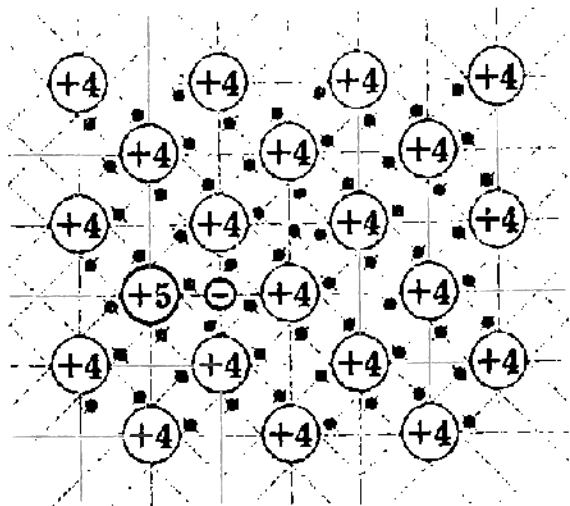


Рис. 271

ными, они осуществляют химическую связь атома мышьяка с четырьмя соседними атомами кремния. Пятый же электрон оказывается очень слабо связанным с атомом мышьяка (рис. 271). Чтобы освободить его, необходима очень небольшая энергия. Уже при комнатной температуре энергия теплового движения атомов оказывается достаточной для отрыва этого электрона от атома, и он становится свободным электроном проводимости.

Итак, введением соответствующей примеси можно значительно увеличить число электронов проводимости в полупроводнике. Число же «дырок» остается таким, каким оно было до введения примеси.

Электроны проводимости в таком полупроводнике — основные носители заряда, а «дырки» — неосновные.

Кремний с примесью мышьяка становится электронным полупроводником (полупроводником *n*-типа)¹.

Примеси, легко отдающие электроны и тем самым увеличивающие число свободных электронов в полупроводниках, называются донорными примесями (от слова «донор» — отдающий).

Полупроводники *p*-типа. Проводимость германия или кремния можно повысить также при помощи примесей трехвалентного вещества, например бора. В этом случае ток в полупроводнике будет связан с движением не отрицательных, а положительных зарядов. Такие полупроводники называют полупроводниками *p*-типа².

Как объясняется проводимость полупроводников *p*-типа?

При введении в кремний атома бора три его валентных электрона осуществляют ковалентную связь с тремя соседними атомами кремния (рис. 272, а). С четвертым же из соседних атомов кремния атом бора ничем не связан, так как у него нет четвертого валентного электрона. Один из ближайших атомов кремния может отдать свой валентный электрон и таким образом заполнить недостающую связь атома бора с четвертым атомом кремния. Тогда у атома кремния, от которого ушел валентный электрон, окажется избыточный положительный заряд — «дырка»

¹ От слова *negativ* — отрицательный.

² От слова *positiv* — положительный.

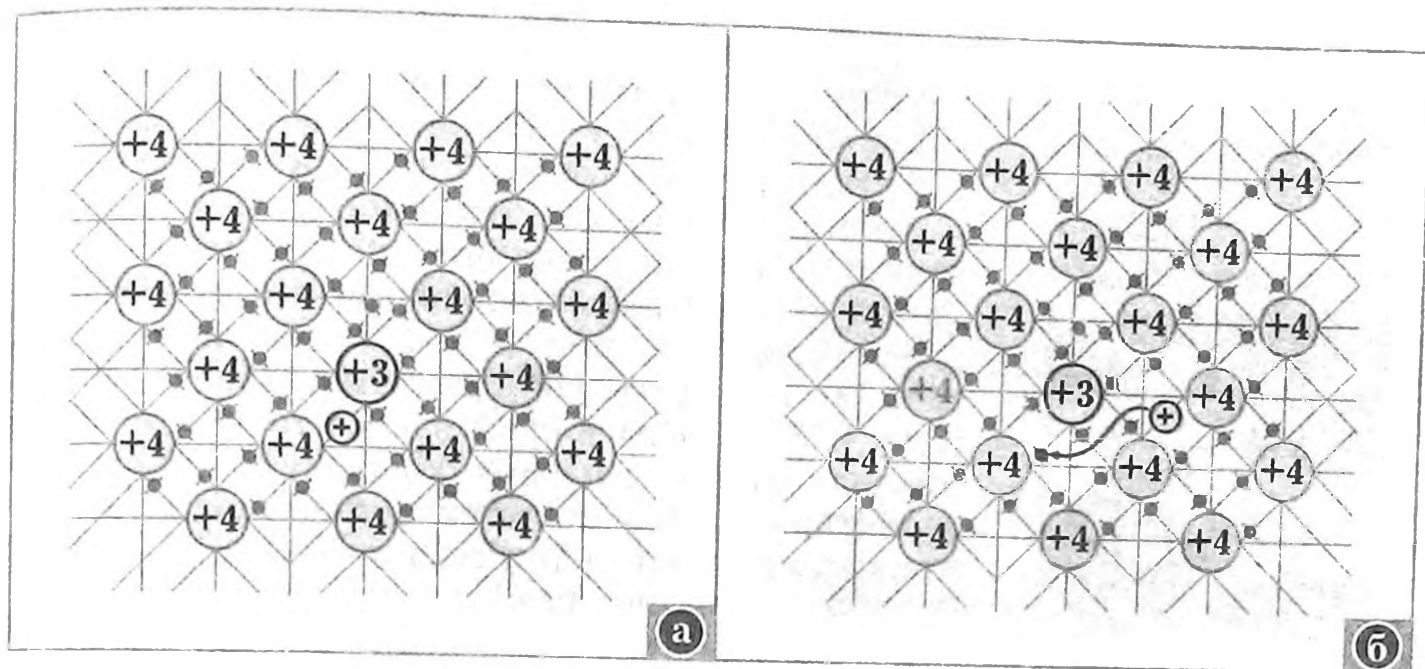


Рис. 272

(рис. 272, б). Таких дополнительных «дырок» образуется столько, сколько атомов бора введено в кристалл кремния.

«Дырки» в полупроводнике *p*-типа будут основными носителями заряда, а электроны проводимости — неосновными.

Легко показать, что нужно очень небольшое количество примеси пяти- или трехвалентного вещества к кремнию для резкого увеличения числа свободных носителей тока — электронов или «дырок».

В этом можно убедиться, произведя несложный расчет.

В 1 м^3 кремния содержится примерно 10^{28} атомов. Концентрация свободных электронов в этом объеме при комнатной температуре, как было установлено экспериментально, составляет $n = 10^{17} \text{ м}^{-3}$. Следовательно, на каждые сто миллиардов атомов кремния приходится один свободный электрон. (Вспомним, что у металлов примерно на каждый атом 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. Какую валентность должна иметь примесь к германиевому полупроводнику, чтобы он обладал: а) электронной проводимостью; б) «дырочной» проводимостью? 2. Почему незначительное количество примеси пятивалентного или трехвалентного вещества к кремнию резко увеличивает его проводимость?

§ 110 Односторонняя проводимость контактного слоя

Среди физических свойств, присущих полупроводникам, наиболее важные применения получили особые свойства контактов между полупроводниками с различными типами проводимости (*n*- и *p*-типа).

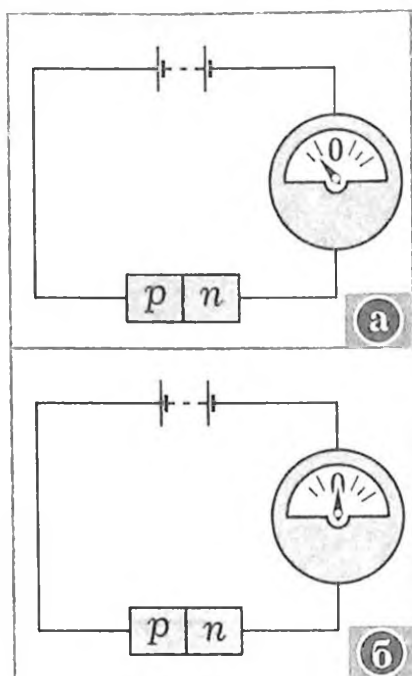


Рис. 273

Включим в цепь кристаллический полупроводник, в котором благодаря введению соответствующих примесей созданы две примыкающие друг к другу области — с проводимостью p -типа и n -типа. Оказывается, что при одном и том же источнике, но при различном подключении его полюсов к такому полупроводниковому устройству в одном случае (рис. 273, а) идет значительный ток, а в другом он практически отсутствует (рис. 273, б). Это показывает, что контакт полупроводников p - и n -типа обладает замечательным свойством — его сопротивление для одного направления тока значительно больше, чем для другого (в тысячи раз!).

В чем причина этого явления?

Рассмотрим, что происходит на границе между «дырочным» и электронным полупроводниками, т. е. на так называемом p — n -переходе, когда он не присоединен к источнику тока.

Электроны в полупроводнике n -типа, являющиеся там основными свободными носителями заряда, участвуют в тепловом движении и диффундируют через границу в полупроводник p -типа, где они «рекомбинируют» с «дырками». Точно так же «дырки» будут диффундировать из «дырочного» полупроводника в электронный и рекомбинировать с электронами. Это происходит подобно тому, как атомы растворенного вещества диффундируют из крепкого раствора в слабый при их соприкосновении.

В результате диффузии приконтактная область обедняется свободными носителями заряда: в полупроводнике n -типа уменьшается концентрация электронов, а в полупроводнике p -типа — концентрация «дырок» (рис. 274, а). Поэтому сопротивление приконтактной области значительно возрастает.

Диффузия электронов и «дырок» через p — n -переход приводит к тому, что электронный проводник, из которого уходят электроны, заряжается положительно, а «дырочный» — отрицательно (рис. 274, б). Между этим двойным слоем зарядов возникает электрическое поле, которое препятствует дальнейшей диффузии основных носителей заряда через контакт полупроводников. При некотором значении напряженности этого поля дальнейшее обеднение приконтактной области свободными носителями заряда прекращается.

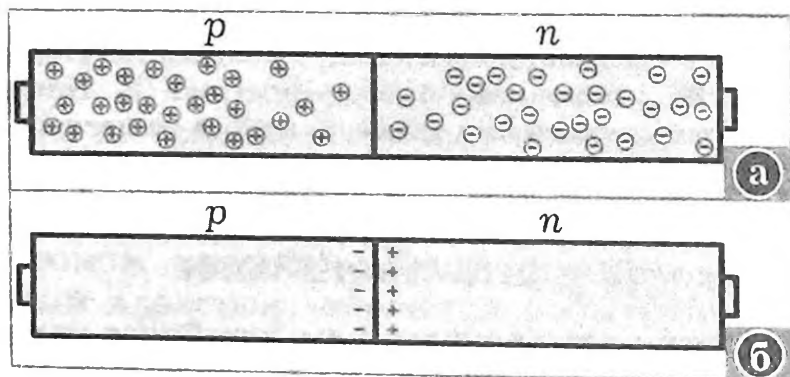


Рис. 274

Присоединим теперь полупроводник, содержащий p — n -переход, к источнику тока так, что его электронная область будет соединена с отрицательным, а «дырочная» — с положительным полюсом источника.

В этом случае электрическое поле, созданное источни-

ком тока, направлено так, что оно будет перемещать основные носители тока в каждой из областей полупроводника (электроны в одной и «дырки» в другой) к p — n -переходу (рис. 275, а). Приконтактная область будет обогащаться основными носителями тока. Напряженность поля между p -и n -полупроводниками уменьшается (рис. 275, б). Через контакт будет проходить заметный ток. Такое включение перехода, когда n -область соединена с отрицательным, а p -область с положительным полюсом источника, называют пропускным.

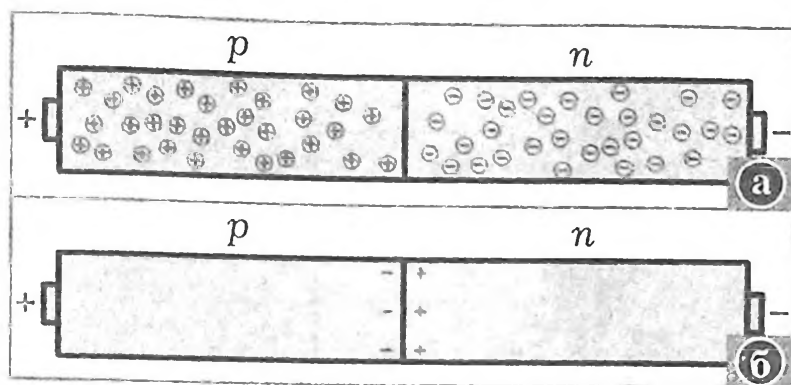


Рис. 275

Если же мы присоединим электронный полупроводник к положительному, а «дырочный» — к отрицательному полюсу источника, то, наоборот, основные носители тока в каждом полупроводнике будут двигаться от контакта в противоположные стороны (рис. 276, а). Приконтактная область будет обедняться основными носителями тока, и напряженность поля p — n -перехода увеличиваться (рис. 276, б). При этом значительно возрастает сопротивление приконтактной области. Ток через переходной слой будет очень мал. Такое включение p — n -перехода называется запирающим. Слабый ток в этом случае осуществляется за счет неосновных носителей, для которых такое включение p — n -перехода пропускное.

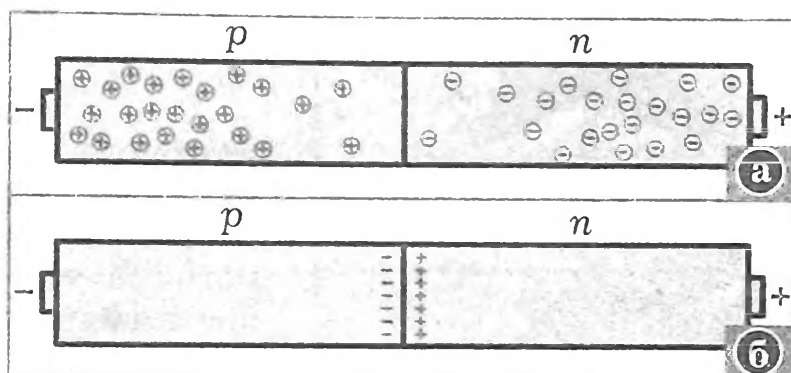


Рис. 276

Таким образом, контакт двух полупроводников с различными видами проводимости обладает свойством хорошо проводить ток в одном направлении и очень плохо в противоположном, т. е. имеет одностороннюю проводимость.

Односторонняя проводимость p — n -перехода используется в выпрямителях переменного тока.

Полупроводниковый диод. Главной частью полупроводникового выпрямителя является прибор, содержащий p — n -переход; этот прибор называется полупроводниковым диодом.

Современные диоды изготавливаются чаще всего из германия или кремния, в которых благодаря соответствующим примесям создаются соприкасающиеся между собой области с электронной и «дырочной» проводимостями.

Если, например, на пластинку германия с электронной проводимостью наплавить каплю индия (рис. 277), то поверхностный слой германия, в который проникнут на некоторую глубину атомы индия, станет «дырочным» полупроводником. Тогда между областями

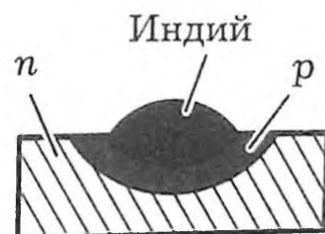


Рис. 277

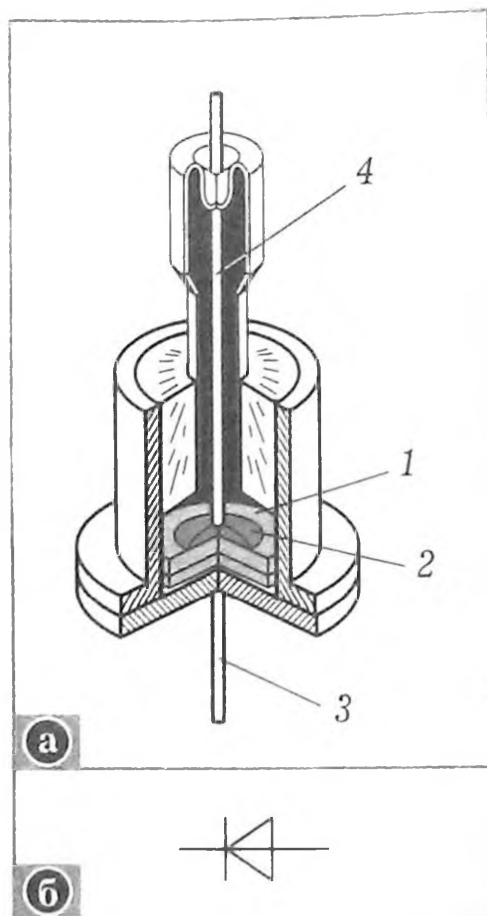


Рис. 278

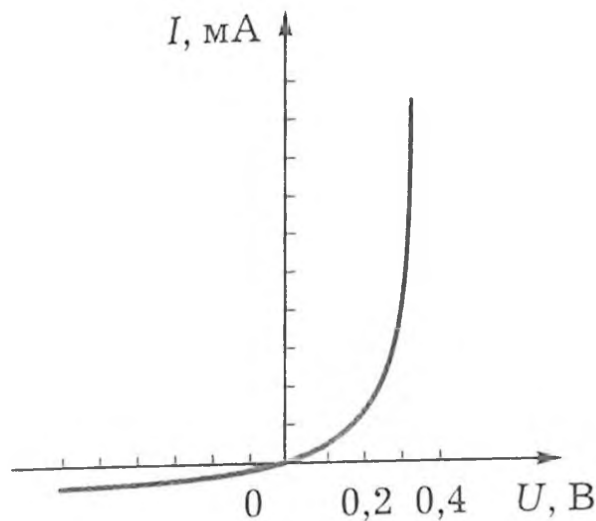


Рис. 279

германия с электронной и «дырочной» проводимостью возникнет $p-n$ -переход.

На рисунке 278, а показано устройство одного из германиевых диодов и его условное обозначение (рис. 278, б). Основная часть диода представляет собой пластинку германия 1 с наплавленным индием 2, которая помещена в металлический корпус, предохраняющий кристалл от внешних воздействий. К германию и индию присоединяют выводы 3, 4, изолированные от корпуса.

Зависимость силы тока через полупроводниковый диод от напряжения, приложенного к нему, т. е. его вольт-амперная характеристика, показана на рисунке 279. Правая ветвь вольт-амперной характеристики соответствует пропускному направлению тока (когда с возрастанием напряжения сила тока резко возрастает), а левая — запирающему.

■ ВОПРОСЫ

1. Как образуется $p-n$ -переход?
2. Какими свойствами обладает $p-n$ -переход?
3. При каком соединении $p-n$ -перехода с источником тока он обладает малым сопротивлением, а при каком — большим?
4. В двух одинаковых закрытых коробках находятся: в одной — полупроводниковый диод, а в другой — небольшой реостат. Концы приборов в каждой коробке выведены наружу и присоединены к клеммам. Как определить, в какой из коробок находится диод?

§ 111 Полупроводниковый триод — транзистор

Все, вероятно, слышали о транзисторах¹, которые являются главной частью радиоприемников, магнитофонов, телевизоров и других приборов. 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 с проводимостью

¹ Слово «транзистор» происходит от английских слов transfer — переносить и resistor — сопротивление.

p -типа создают слой с проводимостью n -типа, называемый базой (рис. 280, а). Одна из разделенных базой областей называется эмиттером, а другая — коллектором. Таким образом, между эмиттером и базой, а также коллектором и базой создаются два p — n -перехода, пропускные направления которых противоположны. На рисунке 280, б показано условное изображение транзистора. Цепь, в которую включены эмиттер и база, называют цепью эмиттера, а цепь, в которую включены база и коллектор, называют цепью коллектора.

Оба p — n -перехода соединяют с двумя источниками тока (рис. 281). При этом переход «эмиттер — база» включают в пропускном, а переход «коллектор — база» — в запирающем направлении.

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», увлекаемые полем p — n -перехода, легко пересекают, почти не рекомбинируя с электронами базы.

Поэтому при изменении силы тока в цепи эмиттера 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 вызвать значительные изменения напряжения на резисторе: при одинаковой силе тока в эмиттере и коллекторе напряжения на них пропорциональны сопротивлениям. В этом и состоит **усилительное** действие транзистора.

Усилительное действие транзистора можно также объяснить, опираясь на то, что его основное свойство состоит в изменении сопротивления перехода «база — коллектор» под действием тока в цепи эмиттера. Это означа-

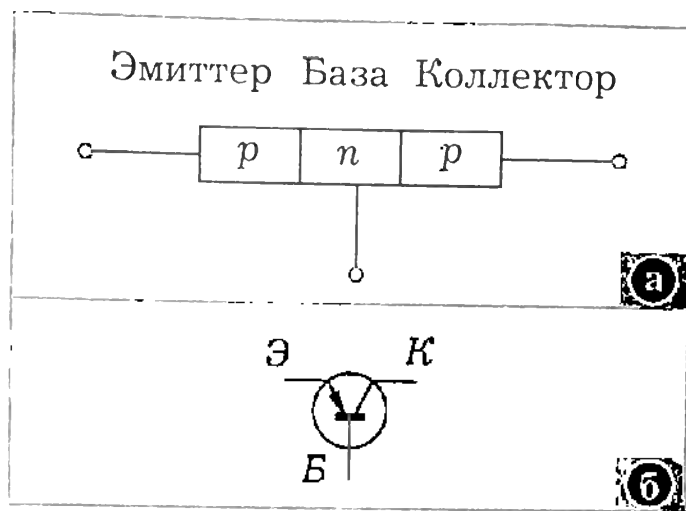


Рис. 280

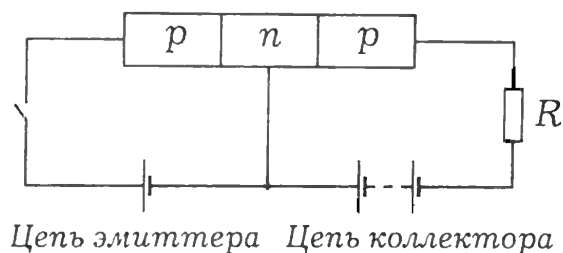


Рис. 281

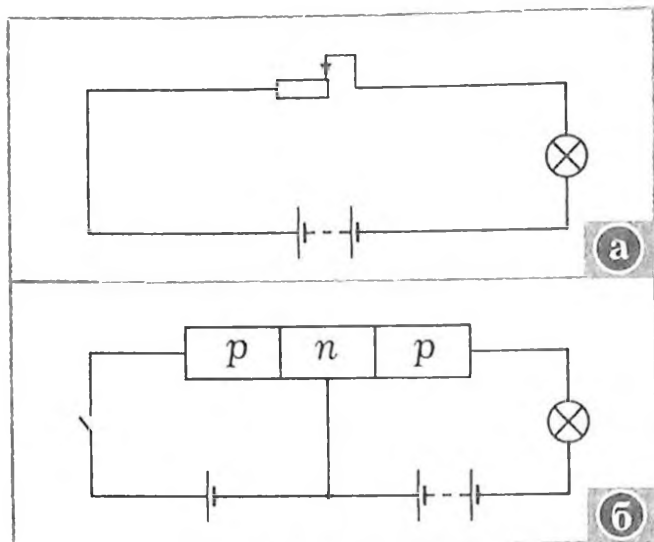


Рис. 282

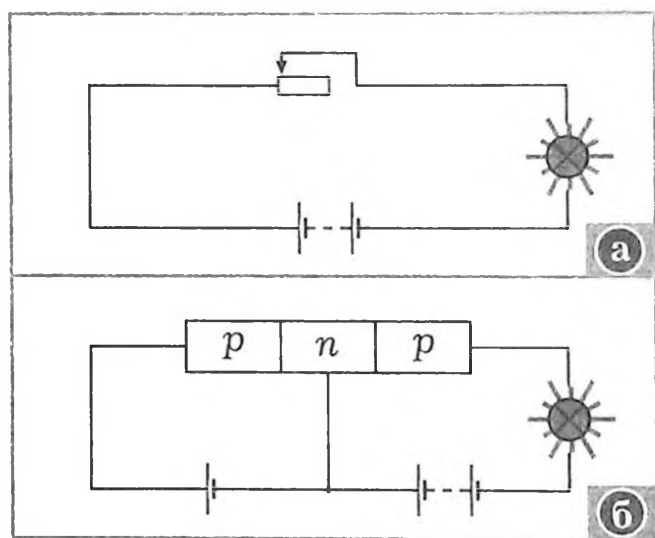


Рис. 283

Передвинем ползунок реостата так, чтобы в цепь была включена незначительная часть его обмотки (рис. 283, а), тогда напряжение в цепи перераспределится: меньшая часть будет на реостате, а большая — на лампе. В этом случае лампа будет ярко светиться.

Подобно этому если замкнуть цепь эмиттера (рис. 283, б), то сопротивление участка «база — коллектор» значительно уменьшится и большая часть напряжения источника окажется на лампе: нить лампы будет ярко светиться.

Следовательно, участок «база — коллектор» в цепи с лампой играет роль переменного сопротивления подобно реостату.

Применение полупроводниковых приборов в технике. Мы рассмотрели лишь некоторые из интереснейших свойств, которыми обладают полупроводники и приборы, основанные на этих свойствах: термистор, фоторезистор, диод, транзистор. Полупроводниковые приборы в настоящее время широко применяются в современной радиотехнике, автоматике, телемеханике и других областях науки и техники.

ет, что участок «база — коллектор» представляет собой переменное сопротивление, подобное реостату.

Чтобы понять работу транзистора как переменного сопротивления, рассмотрим простую цепь с реостатом в качестве переменного сопротивления, включенным в цепь последовательно с лампой (рис. 282, а). Для этой цели возьмем реостат, полное сопротивление которого значительно больше сопротивления лампы.

Как известно, напряжение на каждом из последовательно соединенных проводников пропорционально его сопротивлению ($U = IR$). Пусть в цепь включена вся обмотка реостата. Тогда большая часть напряжения на внешней цепи придется на реостат, а значительно меньшая — на лампу. В результате этого нить лампы не накалится. Подобно этому, пока не включена цепь эмиттера (рис. 282, б), сопротивление участка «база — коллектор», значительно больше, чем сопротивление лампы. (Напомним, что этот $p-n$ -переход включен в запирающем направлении.) В этом случае большая часть напряжения, созданного батареей, будет на участке «база — коллектор», а значительно меньшая часть — на лампе, и поэтому нить ее не будет накалена.

На искусственных спутниках Земли и на межпланетных кораблях установлены солнечные батареи, в которых электрический ток создается за счет энергии излучения Солнца. Во многих странах разрабатываются проекты, в которых предполагается установка таких же солнечных батарей на крышах домов с целью получения энергии для их отопления. В солнечных батареях главной частью также являются полупроводники с $p-n$ -переходами.

Исключительно малые размеры полупроводниковых приборов, иногда всего лишь в несколько миллиметров, долговечность, связанная с тем, что их свойства мало меняются со временем, возможность легко изменять их электропроводность, а также многие другие ценные свойства открывают новые заманчивые перспективы применения полупроводников в недалеком будущем.

Академик А. Ф. Иоффе, работы которого по изучению полупроводников и их применения получили мировое признание, предвидел возможности решения с их помощью многих технических проблем. Он писал: «С помощью полупроводников будут разрешены такие фундаментальные задачи, как прямое превращение тепловой и солнечной энергии в электрическую, а также электрической в механическую и обратно без помощи машин... Самые совершенные радиоприемники и самая сложная аппаратура для сигнализации, автоматики и телеуправления будут иметь ничтожные габариты».



§ 112 Природа электрического тока в вакууме. Термоэлектронная эмиссия

Радиолампы, телевизионные и осциллографические трубки представляют собой приборы, в которых создан вакуум. Под вакуумом понимают газ такого малого давления, при котором молекулы в сосуде не сталкиваются друг с другом. Такой разреженный газ является изолятором, так как в нем нет свободных заряженных частиц — носителей заряда. Но в вакуум можно ввести свободные носители заряда. Тогда он станет проводником тока. Как это можно осуществить?

Наиболее просто использовать для этого свободные электроны, имеющиеся в металлах.

Опыт показывает, что при достаточно высокой температуре металла с его поверхности испускаются электроны. Это явление называется *термоэлектронной эмиссией*¹. Электроны испускаются также при освещении поверхности металла. Такое явление называется фотоэлектронной эмиссией. И наконец, с поверхности металла испускаются электроны, когда на нее попадают быстрые заряженные частицы (электроны, ионы и др.). Это явление называется вторичной электронной эмиссией. Все виды эмиссии широко используются для получения электрического тока в вакууме.

Посмотрим, как, используя, например, термоэлектронную эмиссию, можно получить ток в вакууме.

¹ Слово «эмиссия» означает «испускание».

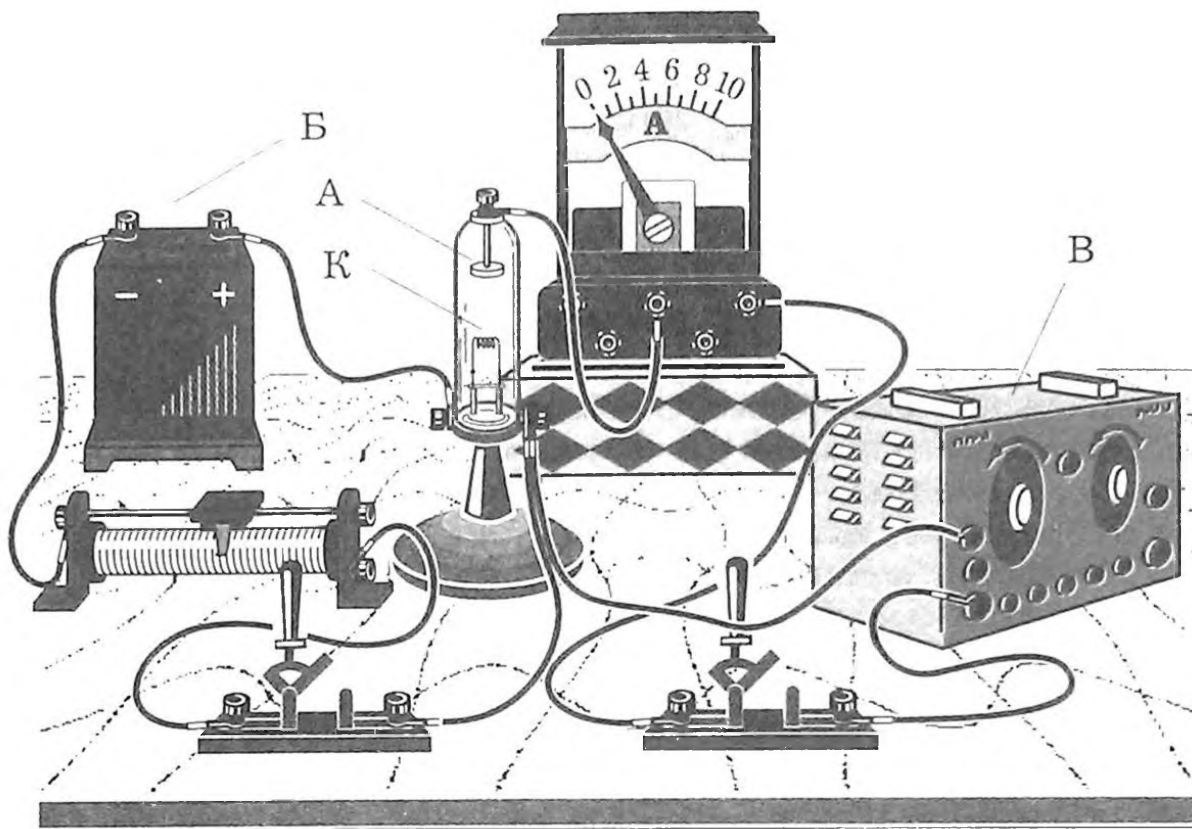


Рис. 284

Возьмем стеклянный баллон со впаянными в него электродами (рис. 284). Один из них в виде металлической (вольфрамовой) нити K может накаливаться электрическим током от батареи B . Другой электрод — это металлическая пластина A .

Присоединим нить к отрицательному полюсу, а пластину A к положительному полюсу источника высокого напряжения B . Тогда нить будет служить *катодом*, а пластина — *анодом*. Включенный в эту цепь гальванометр служит для измерения силы тока.

Когда катод накален, гальванометр показывает какую-то силу тока. Значит, между электродами в вакууме появились заряженные частицы, которые, очевидно, вылетают с раскаленного электрода (нити). Они перемещаются под действием электрического поля от катода к аноду.

Нетрудно убедиться в том, что нить испускает именно отрицательно заряженные частицы, т. е. электроны.

Для этого основную цепь составим так, чтобы теперь нить стала анодом, а пластина — катодом. Мы увидим, что при таком подключении источника тока стрелка гальванометра не отклоняется. В цепи тока нет. Отсутствие тока в этих условиях объясняется тем, что электроны, вылетевшие из накаленной нити, которая теперь служит анодом, возвращаются обратно.

Термоэлектронная эмиссия напоминает процесс испарения жидкости или твердого тела с той разницей, что из нагретого металла «испаряются» заряженные частицы — электроны, а из жидкости — нейтральные молекулы.

Подобно тому как при испарении жидкости совершается отрицательная работа силами притяжения молекул к жидкости, при вылете электронов с поверхности металла совершается отрицательная работа силами притяжения к положительным ионам металла. Эта работа называется *работой выхода*. Она является величиной, характеризующей данный металл (как теплота испарения характеризует свойства данной жидкости).

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.

Вылететь за пределы металла могут, очевидно, только те электроны, которые обладают кинетической энергией, равной или превышающей работу выхода.

При повышении температуры число вылетающих из металла электронов растет, как растет число испаряющихся молекул при повышении температуры жидкости.

Двухэлектронная лампа (диод). Прибор, с помощью которого мы изучали термоэлектронную эмиссию, представляет собой простейший электровакуумный прибор — электронную лампу с двумя электродами. Такая лампа называется *вакуумным диодом*. Катодом лампы служит нить накала. Анодом обычно служит цилиндр, охватывающий нить (рис. 285, слева). Условное изображение диода в схемах показано на рисунке 285, справа.

Мы уже говорили, что через диод может протекать ток только тогда, когда нить накала является катодом. При перемене полюсов источника тока прекращается ток в цепи. Поэтому вакуумный диод, включенный в цепь переменного тока, пропускает ток только в одном направлении и тем самым превращает переменный ток в ток постоянного направления. Это свойство диода широко используется в технике.

Скорость электронов в электровакуумных приборах. В отличие от тока в металлическом проводнике в вакууме электроны движутся между электродами, не сталкиваясь ни с какими другими частицами. Поэтому под действием электрического поля электроны непрерывно ускоряются до попадания на анод.

Рассчитаем, например, с какой скоростью электроны достигают анода, если напряжение между электродами $U = 100$ В.

Если пренебречь начальной скоростью электронов, вылетающих из катода ($v_0 = 0$), то приобретенная ими кинетическая энергия $\frac{m_0 v^2}{2}$ будет равна работе eU , которая совершается при перемещении электронов в электрическом поле:

$$\frac{m_0 v^2}{2} = eU.$$

Отсюда

$$v = \sqrt{\frac{2Ue}{m_0}}, \quad v = \sqrt{\frac{2 \cdot 100 \text{ В} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}}{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}}} \approx 6 \cdot 10^6 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Эта скорость в десятки миллиардов раз больше средней скорости упорядоченного движения электронов в металле.

■ ВОПРОСЫ

1. Что такое термоэлектронная эмиссия?
2. Какие существуют еще виды электронной эмиссии?
3. Что такое работа выхода?
4. Где применяется диод и на каком свойстве основано его применение?

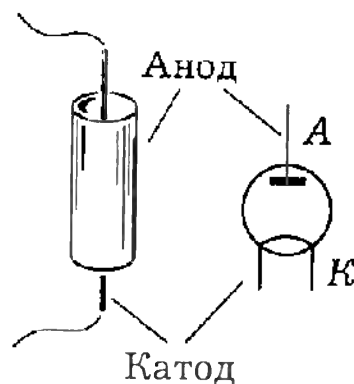


Рис. 285

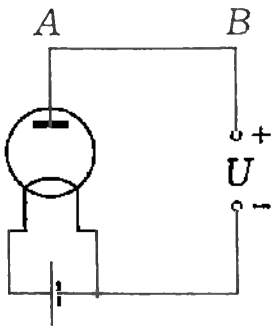


Рис. 286

■ ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Сила тока, проходящего через вакуумный диод и подводящие провода сечением $0,8 \text{ мм}^2$, равна 200 мА . Напряжение, которое подается между анодом и катодом лампы $U = 180 \text{ В}$. Сравните среднюю скорость движения электронов между электродами лампы и в проводнике AB (рис. 286). Концентрацию электронов в проводнике принять равной 10^{28} м^{-3} . Начальную скорость электронов при эмиссии считать равной нулю.

Решение. Скорость электронов у анода можно найти исходя из того, что их кинетическая энергия равна работе поля по перемещению электронов на этом участке:

$$\frac{m_0 v^2}{2} = Ue,$$

откуда скорость электронов у анода равна:

$$v = \sqrt{\frac{2Ue}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 180 \text{ В} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}}{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}}} = 8 \cdot 10^6 \text{ м/с}.$$

Это конечная скорость электронов у анода. Средняя же скорость электронов на участке между катодом и анодом равна половине конечной скорости:

$$v_{\text{ср}} = \frac{v}{2} = 4 \cdot 10^6 \text{ м/с}.$$

Среднюю скорость электронов в проводнике AB можно найти из формулы для силы тока $I = q_0 n \bar{v} S$. Предварительно надо значение силы тока и площади сечения проводника перевести в единицы СИ ($200 \text{ мА} = 0,2 \text{ А}$ и $0,8 \text{ мм}^2 = 0,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$):

$$\bar{v} = \frac{I}{q_0 n S} = \frac{0,2 \text{ А}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3} \cdot 0,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2} \approx 1,6 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}.$$

Таким образом, средняя скорость электронов между катодом и анодом больше средней скорости электронов в проводнике в $\frac{4 \cdot 10^6}{1,6 \cdot 10^{-4}} = 2,5 \cdot 10^{10}$ раз, т. е. в 25 миллиардов раз.

За счет чего же достигается одинаковая сила тока на этих участках? Сила тока — это количество электричества, переносимого через поперечное сечение проводника за одну секунду. В металлическом проводнике очень много свободных электронов, участвующих в создании тока, их концентрация $n = 10^{28} \text{ м}^{-3}$. Поэтому даже при малой средней скорости их упорядоченного движения сквозь сечение проводника проходит очень много электронов и они переносят достаточно большой заряд.

На участке же катод — анод скорость электронов очень велика, но количество электронов мало. Это небольшая часть электронов, которая вылетает из металлического катода вследствие его высокой температуры — вследствие электронной эмиссии.

■ УПРАЖНЕНИЕ 46

1. Какой наименьшей скоростью должен обладать электрон, чтобы вылететь за пределы поверхности: а) цезия; б) серебра?

§ 113 Электронно-лучевая трубка

В электровакуумных приборах электроны на пути от катода к аноду движутся ускоренно и приобретают большую кинетическую энергию. Если в аноде двухэлектродной лампы сделать отверстие, то часть электронов, разгоняемых полем между электродами, будет вылетать через отверстие и двигаться далее по инерции. При этом в пространстве за анодом образуется узкий пучок электронов, движущихся с большой скоростью. Электронные пучки получили широкое применение благодаря ряду свойств, которыми они обладают.

Рассмотрим специальный электровакуумный прибор, в котором образуются электронные пучки. Таким прибором является *электронно-лучевая трубка* (рис. 287). В стеклянном баллоне 1, из которого откачан воздух до глубокого вакуума, в узкой ее части находится устройство, создающее электронный пучок. Его называют *электронной пушкой*. Она состоит из нити накала (катод) 2, анода в виде цилиндра 3 и электрода 4 в виде цилиндра с отверстием в торце, который управляет интенсивностью электронного пучка.

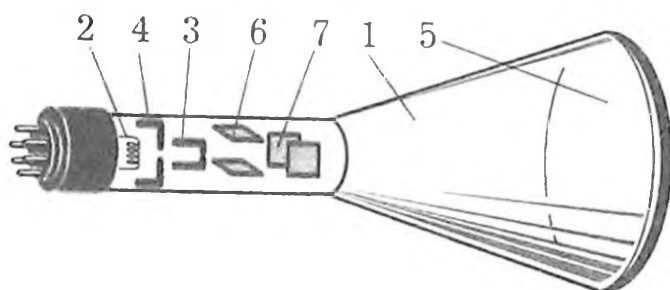


Рис. 287

Когда нить накалена и между ней и анодом приложено высокое напряжение, электроны, испускаемые нитью, пролетают через анод в виде узкого электронного пучка. Этот пучок попадает на экран 5. Экран изнутри покрывают особым веществом (люминофором), которое светится при ударе попадающих на него электронов. На экране можно видеть светящуюся точку в том месте, куда попадает электронный пучок.

Если с помощью отдельного источника тока сделать потенциал электрода 4 отрицательным по отношению к катоду, то он будет уменьшать скорость электронов на пути к аноду. Увеличивая или уменьшая потенциал этого электрода, можно изменять скорость электронов, попадающих на экран, и тем самым регулировать яркость светящейся точки.

В электронно-лучевой трубке имеется, кроме того, дополнительное устройство, позволяющее изменять направление электронного луча. Этим устройством являются две пары пластин 6 и 7, расположенные вдоль оси трубки во взаимно перпендикулярных плоскостях. Когда между пластинами создают электрическое поле, оно действует не вдоль луча, а в перпендикулярном к нему направлении. Поэтому оно изменяет направление луча. Если подать напряжение на первую пару пластин 6, то электронный луч, проходя между ними, будет отклоняться в сторону положительно заряженной пластины. При этом светящаяся точка сместится в вертикальном направлении к краю экрана — вверх или вниз и тем значительно, чем больше напряжение.

Точно так же, если подать напряжение на вторую пару пластин 7, электронный луч будет отклоняться ими в горизонтальной плоскости и светящаяся точка на экране сместится влево или вправо.

По отклонению светящейся точки на экране можно судить о напряжении, которое приложено к пластинам. Благодаря ничтожной инертности

электронов электронный луч практически мгновенно реагирует на изменение напряжения. Поэтому электронно-лучевая трубка используется для наблюдения за быстро протекающими изменениями напряжений. Прибор, в котором электронно-лучевая трубка применяется для исследования быстро протекающих процессов, называется *электронным осциллографом*.

Особенно широкое применение электронно-лучевая трубка получила в телевидении (телевизионная трубка). Эти и другие применения электронно-лучевой трубки будут изучаться в последующих темах курса физики.

Свойства электронных пучков. Электронные пучки обладают рядом свойств, которые используются, в частности, в электронно-лучевой трубке. Эти свойства состоят в следующем.

Электронные пучки сами по себе *распространяются прямолинейно*. Но они *отклоняются в электрических полях*, силовые линии которых направлены под углом к направлению движения электронов в пучках. Это свойство пучков позволяет отклонять их с помощью пар пластин, на которые подается напряжение.

Электронные пучки *отклоняются также магнитным полем*, так как на электроны, движущиеся в нем, действует сила Лоренца. Приблизив к действующей электронно-лучевой трубке магнит, можно наблюдать отклонение электронного пучка.

Электроны, образующие пучок, *обладают большой энергией*, так как они движутся с огромными скоростями (порядка 10^7 м/с). Благодаря этому они и вызывают свечение экрана. Если мощные электронные пучки в вакуумной камере направить на металл, то они вызывают его сильный разогрев и даже плавление. Это свойство пучков используется в технике для высококачественной вакуумной плавки металлов.

■ ВОПРОСЫ

1. Как устроена электронно-лучевая трубка? 2. Каковы свойства электронных пучков? 3. Где применяется электронно-лучевая трубка?

■ УПРАЖНЕНИЕ 47

1. Определите скорость, с которой электроны бомбардируют экран электронно-лучевой трубки, если анодное напряжение равно 8 кВ.
2. В поле, созданное пластинами вертикального отклонения электронного луча, влетает электрон со скоростью 10^7 м/с. Эта скорость направлена параллельно пластинам. Длина пластин 2 см, расстояние между ними 1 см. Каково напряжение между пластинами, если за время движения в поле электроны отклоняются на 1 мм?

§ 114

Природа электрического тока в растворах электролитов. Закон Фарадея

Носители электрического заряда в электролитах. Когда электрический ток проходит через металлы, то никаких химических изменений с ними не происходит. Это объясняется тем, что носители тока в металлах — электроны. Но существует такой класс проводников, в которых электрический ток всегда сопровождается их химическими изменениями. Такими провод-

никами являются растворы солей, кислот и оснований, а также их расплавы. Их называют *электролитами*.

Соединим с источником тока последовательно лампу и 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 — ток в цепи не идет (точнее, очень мал). Однако если мы растворим в воде какую-нибудь соль, например медный купорос, то лампа загорится, а на катоде выделится из раствора медь (рис. 288).

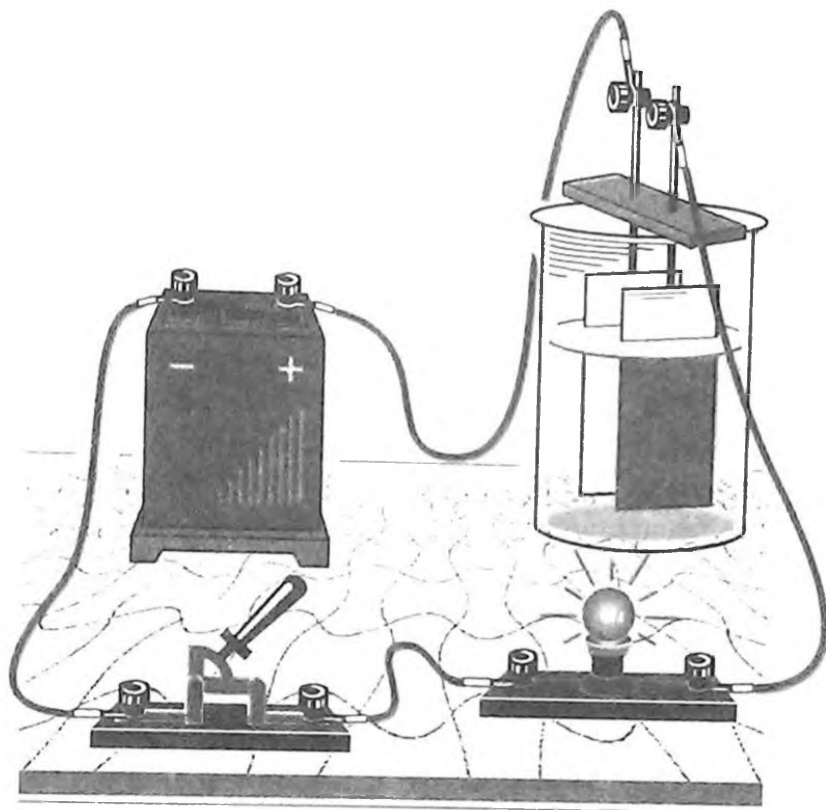


Рис. 288

При прохождении электрического тока через электролиты вместе с зарядом всегда переносится вещество. 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. Это явление называется *электролитической диссоциацией*. Значит, в таких растворах всегда содержится некоторое число ионов — катионов (положительных ионов) и анионов (отрицательных ионов). Пока электрическое поле отсутствует, ионы совершают только беспорядочное 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. 289).

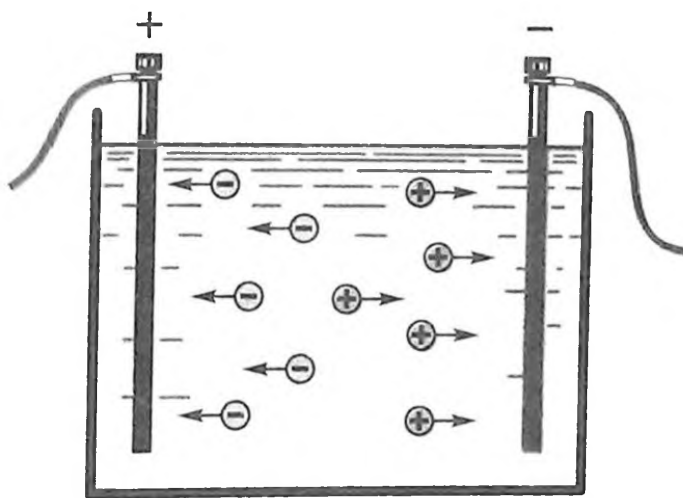


Рис. 289

Электрический ток в растворах электролитов представляет собой перемещение ионов обоих знаков в противоположных направлениях.

Опыт показывает, что сила тока в электролитах линейно зависит от напряжения, т. е. для электролитов справедлив закон Ома.

Технические применения электролиза. Перенос вещества при прохождении электрического тока через электролиты называется *электролизом*. Электролиз получил широкое применение в технике. На нем основана

электрометаллургия — получение щелочных и щелочно-земельных металлов, а также таких металлов, как алюминий, магний, бериллий и др., путем электролиза расплавленных руд.

Для *очистки металлов* от примесей, например рафинирования меди, тоже используется явление электролиза. Отливку из металла, содержащего примеси, помещают в электролитическую ванну с раствором серной кислоты и сульфатом меди в качестве анода. На катод, которым служит лист меди, при электролизе осаждается чистая медь.

Электролиз применяется также в *гальваностегии*, т. е. в процессах покрытия изделий тонким слоем металла, например никелем, хромом, серебром и др. Это делается не только для придания изделиям красивого внешнего вида, но и для предохранения их от коррозии.

Если поверхность рельефных изделий покрыть толстым слоем металла, то, сняв осажденный слой, можно получить точный слепок этого изделия. Для того чтобы слепок легко отделялся, на изделия наносят тонкий слой графита. Такой способ получения копий (со старинных монет, барельефов, скульптур и т. д.) называется *гальванопластикой*. Этот процесс используется также в полиграфической промышленности для получения копий с оттисков типографского набора (матрицы).

Применения электролиза более подробно рассматриваются в курсе химии (X класс).

Закон Фарадея. Электронная теория позволяет рассчитать массу вещества, выделяющегося при электролизе. Эта масса определяется массой всех N ионов, которые осели на электроде. В § 32 мы видели, что

$$N = \frac{m}{M} N_A,$$

где m — масса вещества, M — его молярная масса, а 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 $m = \frac{MQ}{N_A q_0}$.

Заряд любого иона равен заряду одновалентного иона, т. е. заряду электрона e , умноженному на валентность Z иона: $q_0 = eZ$.

Таким образом,

$$m = \frac{M}{N_A e Z} Q.$$

 (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 (1) следует, что масса вещества, выделившегося на электроде, пропорциональна заряду, прошедшему через раствор.

Эта зависимость впервые была экспериментально установлена М. Фарадеем в 30-х годах прошлого века и носит название *закона Фарадея*.

Если постоянный множитель в формуле (1) обозначить через k :

$$\frac{M}{N_A e Z} = k,$$

то закон Фарадея можно записать в виде

$$m = kQ.$$

(2)

Коэффициент k в формуле (2) называется *электрохимическим эквивалентом* данного вещества. Он выражается в килограммах на кулон (кг/Кл).

Электрохимический эквивалент численно равен массе вещества, выделяющегося на электродах при прохождении через электролит заряда 1 Кл.

Закон Фарадея сыграл значительную роль в истории развития физики. На его основе впервые определено значение заряда электрона.

Формула (1) показывает, что заряд одновалентного иона (заряд электрона)

$$e = \frac{MQ}{mN_A Z}.$$

Из величин, входящих в формулу, для вычисления заряда электрона нужно измерить только m и Q .

■ 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. От чего зависит электрохимический эквивалент вещества?

■ УПРАЖНЕНИЕ 48

1. Вычислите электрохимический эквивалент серебра, если его валентность $Z = 1$, а молярная масса $M = 0,108$ кг/моль.
2. При электролизе раствора медного купороса CuSO_4 была совершена работа $2 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$. Определите количество выделившейся меди, если напряжение на зажимах электролитической ванны 6 В .
3. При прохождении тока через раствор серной кислоты выделяется $0,5 \text{ л}$ водорода при нормальных условиях. Сколько времени потребовалось для этого, если сила тока в цепи равна 2 А ?
4. При определении электрохимического эквивалента меди были получены следующие данные: время пропускания тока 25 мин , сила тока $0,6 \text{ А}$, масса катода до опыта $52,41 \text{ г}$, а после опыта $52,70 \text{ г}$. Какое значение электрохимического эквивалента меди было получено на основе этого опыта?

§ 115 Природа электрического тока в газах

Газы в естественном состоянии не проводят электрический ток. В этом мы убеждаемся всякий раз, когда создаем воздушный зазор в цепи, например с помощью выключателя, и тем самым прекращаем ток.

Но при определенных условиях газы становятся проводниками. Рассмотрим опыт, который позволяет выяснить эти условия.

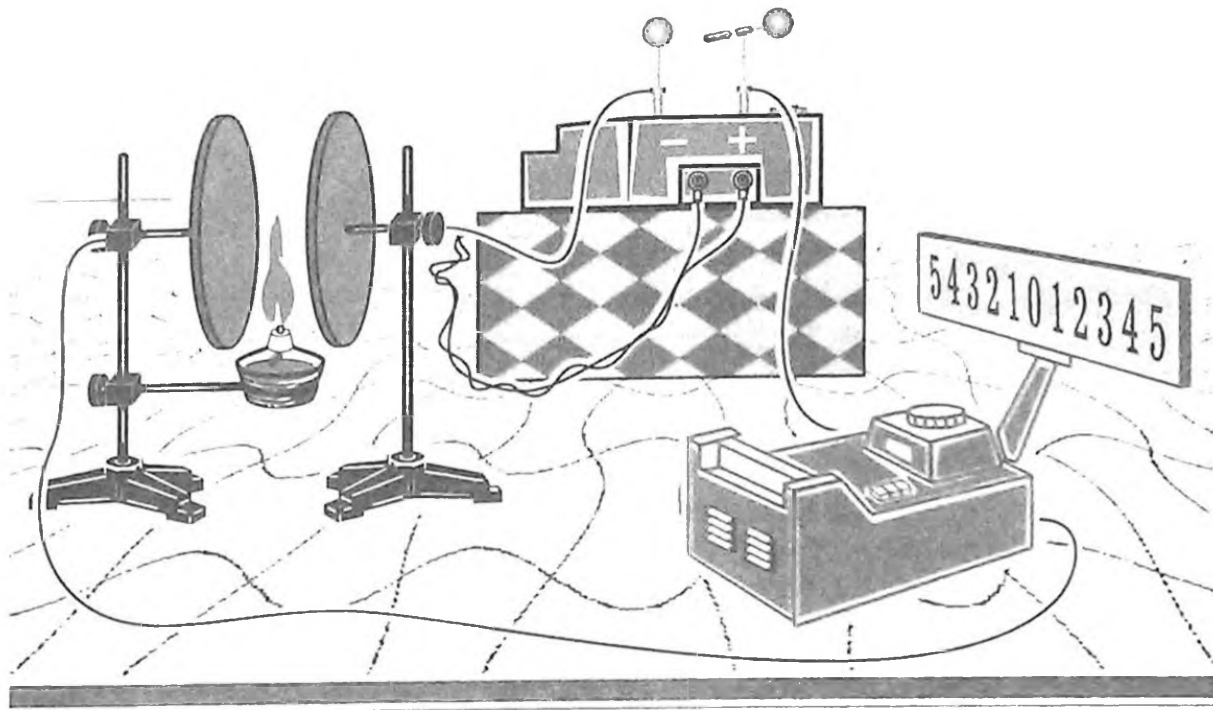


Рис. 290

Две металлические пластины, разделенные воздушным промежутком, присоединяются к источнику высокого напряжения (рис. 290). В эту цепь включают чувствительный зеркальный гальванометр. По положению светящегося пятнышка на шкале убеждаются, что тока в цепи нет.

Отсутствие тока в цепи указывает на то, что в воздухе нет свободных носителей электрических зарядов или их очень мало. Но, приблизив к пластинам, например, пламя горелки, можно убедиться в том, что в цепи возник ток: луч гальванометра отклонился. Значит, в воздушном пространстве появились свободные заряженные частицы. Что они собой представляют и каковы причины их появления?

В пламени протекают интенсивные химические реакции, сопровождающиеся выделением энергии. За счет этой энергии от части молекул или атомов газа отрываются электроны. Этот процесс называется *ионизацией*. В результате ионизации вместо нейтральной молекулы или атома возникают положительный ион и электрон.

Пламя представляет собой частично ионизированный газ, содержащий свободные ионы и электроны. Газ ионизуется также под действием ультрафиолетового, рентгеновского или радиоактивного излучения.

Некоторая часть электронов, отделившихся под действием ионизаторов от атомов газа, «прилипает» к нейтральным атомам или молекулам газа. Тогда появляются еще и анионы, несущие избыточный отрицательный заряд. Ионизованный газ состоит из ионов обоих знаков и электронов. Когда эти заряженные частицы попадают в электрическое поле между электродами, возникает электрический ток. Катионы перемещаются к катоду, а электроны и анионы — к аноду.

Упорядоченное перемещение этих свободных заряженных частиц под действием электрического поля и представляет собой ток в газе (газовый разряд).

Итак, носителями электрического заряда в ионизованных газах являются *электроны и ионы обоих знаков*.

Несамостоятельный разряд. Если из газового промежутка между электродами в рассмотренном выше опыте убрать пламя или устранить любую причину, вызвавшую ионизацию, то ток в цепи прекратится. Это объясняется тем, что после устранения действия ионизатора электроны и ионы сталкиваются и превращаются в нейтральные атомы или молекулы. Свободные заряды исчезают, и вместе с ними исчезает проводимость газа. Столкновение электронов и ионов и образование при этом нейтральных атомов или молекул называется *рекомбинацией*.

Газовый разряд называется *несамостоятельным*, если проводимость газа связана только с действием внешнего ионизатора.

§ 116 Самостоятельный разряд

В окружающем нас воздухе всегда имеется некоторое незначительное число ионов и электронов, возникающих под действием радиоактивных излучений земной коры, ультрафиолетового излучения Солнца, а также других излучений, проникающих в земную атмосферу из космического пространства. Но число этих заряженных частиц настолько ничтожно, что оно не создает сколько-нибудь заметной электропроводности воздуха. Однако, если между электродами создать высокое напряжение, проводимость воздуха между этими электродами резко возрастает. В этом нас убеждает, например, опыт с источником высокого напряжения. Когда между его электродами создано высокое напряжение, между ними проскакивает искра, которая представляет собой ток в газе. Это значит, что при высоком напряжении между электродами в воздухе появляется значительное число свободных заряженных частиц. Какова причина их появления?

Ионизация при соударении. Свободные заряженные частицы, всегда имеющиеся в воздухе, ускоряются электрическим полем и при своем движении сталкиваются с нейтральными атомами или молекулами газа. Пока напряженность электрического поля сравнительно мала, кинетическая энергия, которую приобретают эти заряженные частицы между столкновениями, также невелика. Поэтому их соударения с атомами не приводят к ионизации атомов. Однако при большой напряженности электрического поля электроны разгоняются между двумя столкновениями до значительных скоростей. При этом они приобретают кинетическую энергию, достаточную для того, чтобы при соударении с атомом выбить из него электрон. В этом случае происходит ионизация атома. Такой процесс называется *ионизацией при соударении*.

Одновременно происходит, конечно, и обратный процесс — столкновение ионов с электронами и превращение их в нейтральные атомы, т. е. рекомбинация.

При столкновении электрона с атомом (рис. 291, а) образуется еще один электрон и положительный ион. Таким образом вместо одной заряженной частицы появляются три — ион и два электрона. Ион будет двигаться к катоду, а два электрона — к аноду (рис. 291, б). Теперь уже два электрона ускоряются в электрическом поле и при столкновении с атомами газа ионизуют их. В результате этого образуются еще два иона и два электрона (рис. 291, в), т. е. всего четыре электрона. Все они принимают участие в ионизации. При столкновении этих четырех электронов с атома-

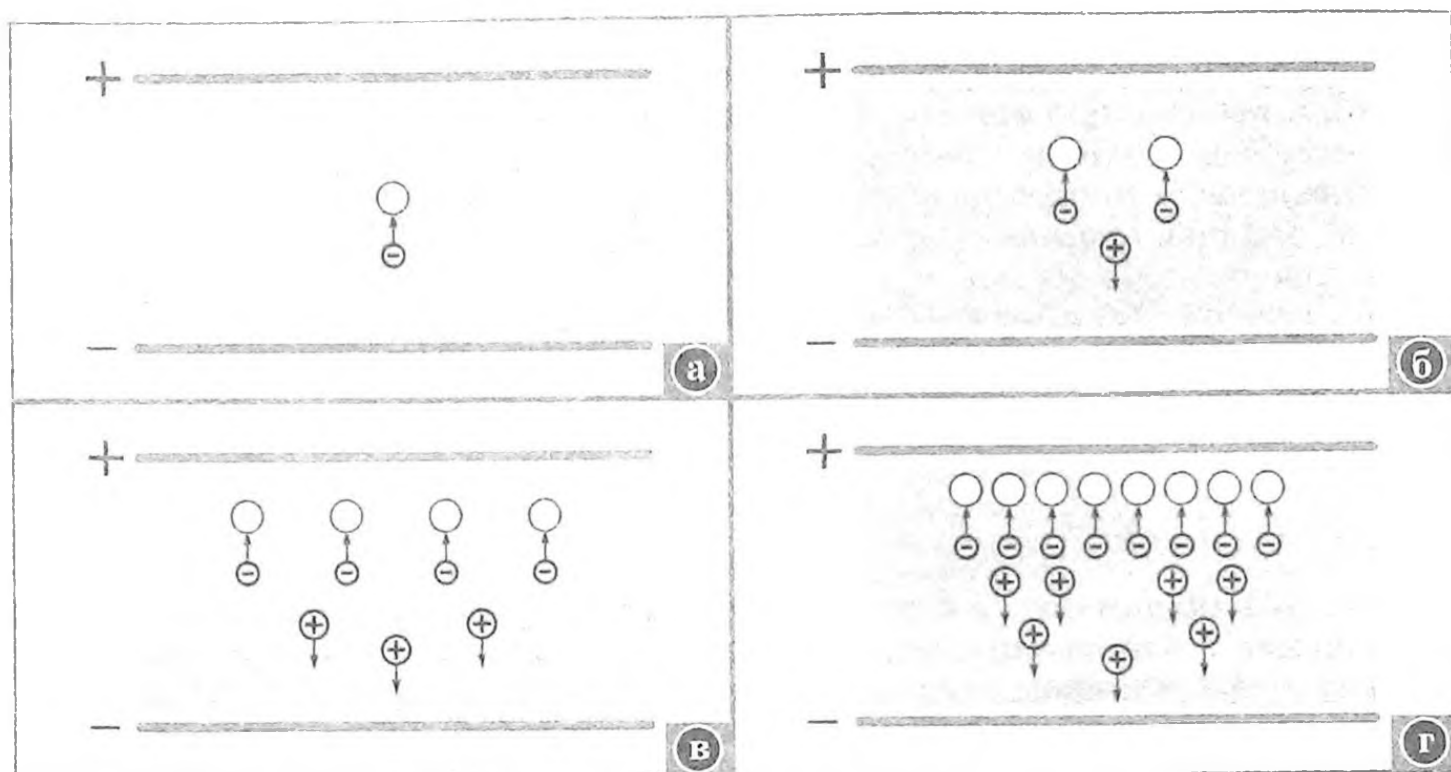


Рис. 291

ми будет уже восемь электронов (рис. 291, г) и т. д. Описанный процесс имеет сходство с образованием снежной лавины в горах и поэтому получил название *электронной* или *ионной лавины*. (Следует иметь в виду, что на рисунке 291 не показано большое число атомов, среди которых движутся электроны, а изображены только те из них (кружочки без знаков), которые в данный момент участвуют в соударениях.)

Конечно, какое-то число электронов и ионов не достигает электродов и не участвует в создании тока, так как они рекомбинируют при столкновениях. Но после начала образования лавины заряженных частиц процесс ионизации значительно преобладает над рекомбинацией. Концентрация электронов и ионов, а значит и электропроводность газов, сильно возрастает. Поэтому при достижении напряжений, достаточных для образования лавины заряженных частиц, сила тока резко возрастает.

При каких условиях возникает самостоятельный разряд? В образовании лавин участвуют и положительные ионы, которые под действием электрического поля движутся к катоду. Бомбардируя катод, они выбивают из него электроны (вторичная электронная эмиссия), которые дают начало новым лавинам электронов и ионов. Если бы ионы не выбивали электроны из катода, то однажды созданная лавина заряженных частиц дошла бы до электродов и разряд в газе прекратился бы. Для образования каждой новой лавины нужен хотя бы один электрон. Эти электроны появляются благодаря тому, что положительные ионы выбивают их из катода. Поэтому начавшийся лавинный разряд не прекращается. Таким образом при определенном напряжении электрический разряд в газе сам себя поддерживает.

Электрический разряд в газе, который продолжается после удаления внешних ионизаторов, называется *самостоятельным разрядом*. При самостоятельном разряде обычно наблюдается свечение газа.

Вольт-амперная характеристика газового разряда. Измеряя силу тока в газах при различных напряжениях, можно увидеть, что сила тока зави-

сит от напряжения так, как изображено на рисунке 292. Объясним эту зависимость.

Ионизатор ежесекундно создает в пространстве между электродами некоторое число электронов и ионов. Столько же электронов и ионов соединяются и образуют нейтральные атомы (рекомбинируют). При создании электрического поля между электродами часть электронов и ионов будет достигать электродов, не рекомбинируя, и создавать ток. По мере увеличения напряжения все большее число заряженных частиц будет достигать электродов. Поэтому сила тока растет прямо пропорционально напряжению (участок OA).

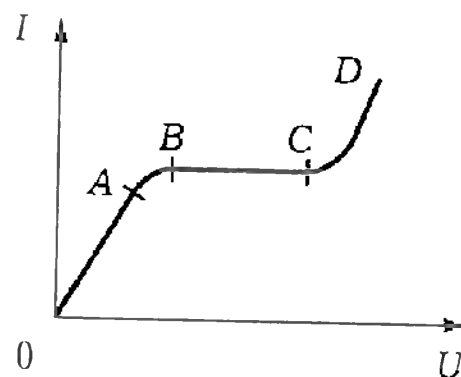


Рис. 292

Когда под действием поля большая часть заряженных частиц достигнет электродов, резервы для дальнейшего роста тока уменьшатся и прямая пропорциональность нарушится (участок AB). Когда же эти резервы полностью исчерпаются, т. е. все ежесекундно создаваемые электроны и ионы будут за это время достигать электродов, рост тока прекратится, несмотря на увеличение напряжения: наступит насыщение (участок BC).

При дальнейшем значительном увеличении напряжения наступает самостоятельный разряд и сила тока резко возрастает (участок CD).

■ ВОПРОСЫ

1. Какой разряд в газах называется несамостоятельным? 2. Что называется самостоятельным разрядом? При каких условиях он возникает?

§ 117 Различные виды разряда в газах

Искровой разряд. Возникновение самостоятельного разряда в газе при атмосферном давлении приводит к пробое газового промежутка. Это явление наблюдается при искровом разряде.

Раздвинем электроды источника высокого напряжения. Пока напряженность поля невелика, газовый промежуток между ними является изолятором.

Однако при большой напряженности поля достаточно незначительного числа электронов, всегда имеющих в атмосфере, чтобы благодаря ионизации при соударении возникла электронная и ионная лавина. При некотором напряжении газ утрачивает свои изолирующие свойства и между электродами появляется электрическая искра. Она имеет вид ярко светящегося канала, соединяющего электроды.

Гигантскую электрическую искру представляет собой молния. Она возникает между двумя разноименно заряженными облаками (или между облаком и землей), когда в атмосфере между ними напряженность электрического поля делается достаточно большой. Сила тока в молнии огромна и колеблется обычно от 10 000 до 200 000 А, а напряжение между облаком и землей перед возникновением молнии достигает 10^8 — 10^9 В. Однако количество электричества, которое при этом протекает, в среднем составляет всего несколько десятков кулонов, так как разряд длится тысячные доли секунды. Поэтому энергия разряда молнии сравнительно мала.

Дуговой разряд. Известна еще одна важная форма электрического 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 два соприкасающихся угольных электрода, присоединенных к источнику тока, можно увидеть, что между концами углей возникает яркое свечение газа, а сами угли раскаляются. Рассматривая дуговой разряд через темное стекло, можно заметить, что свет исходит преимущественно от концов углей. Свечение самой дуги — яркой изогнутой полоски, 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 в 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 (термоэлектронная эмиссия), ионизуют воздух и обеспечивают большую концентрацию заряженных частиц в дуге.

Дуговой разряд находит важные технические применения. Впервые дуга была применена русским инженером П. Н. Яблочковым для освещения (1876 г.). Вследствие высокой температуры дуга широко используется для сварки и резания металлов. Такой способ сварки впервые был разработан русскими изобретателями Н. И. Бенардосом (1885 г.) и Н. Г. Славяновым (1890 г.).

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.

Электрический ток в разреженных газах. До сих пор мы рассматривали самостоятельный разряд в газах при атмосферном давлении. Для такого разряда необходимо, чтобы напряженность электрического поля была большой (исключение — дуговой разряд). Однако в разреженном газе самостоятельный разряд может возникнуть в электрическом поле значительно меньшей напряженности.

Это можно обнаружить при помощи следующего опыта. Возьмем стеклянную трубку с двумя металлическими электродами (рис. 293). 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 начали откачивать газ из трубки, в ней возникает разряд, сопровождаемый свечением газа. В разреженном газе электроны реже сталкиваются с атомами и за время между столкновениями успевают приобрести достаточную для ионизации энергию в электрическом поле с мень-

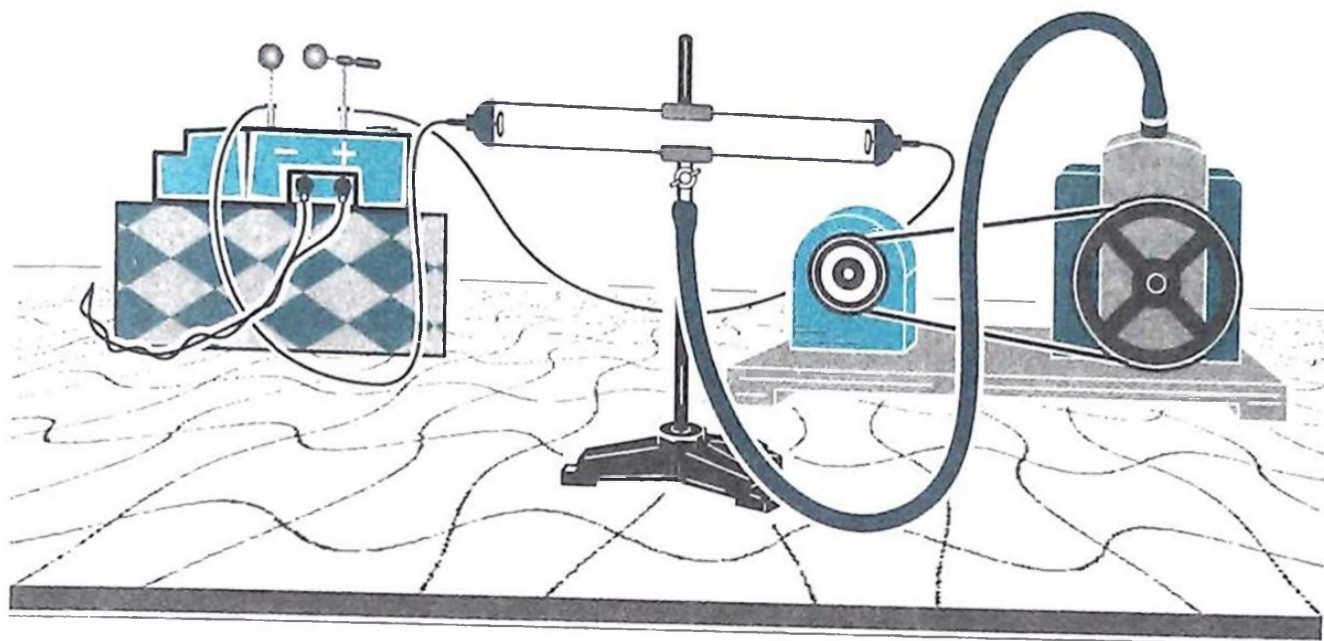


Рис. 293

шей напряженностью. Ионизация атомов электронами приводит к образованию новых ионов и электронов, проводимость газа увеличивается, и возникает разряд. Между электродами трубки образуется светящийся жгут.

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 в несколько миллиметров ртутного столба видны две основные области тлеющего разряда: катодное темное пространство и светящийся столб у анода (рис. 294). Цвет свечения зависит от природы газа.



Рис. 294

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.

§ 118 Плазма

Мы выяснили, что в газе при определенных условиях возникают лавины электронов и ионов. Концентрация заряженных частиц в газе резко возрастает: от 10^8 при обычных условиях до 10^{18} — 10^{20} частиц в 1 м^3 в условиях самостоятельного разряда, т. е. увеличивается в десятки и сотни миллиардов раз. Газ при такой концентрации заряженных частиц называют *плазмой*.

Плазма обладает рядом специфических свойств. Прежде всего она является проводником электрического тока.

В обычном газе происходят лишь упругие столкновения частиц, при которых их внутреннее состояние не изменяется. В плазме же наряду с упругими происходят и неупругие столкновения, которые приводят к ряду новых процессов — ионизации, возбуждению атомов, сопровождающемуся излучением света, и рекомбинации частиц.

Температура плазмы, которая создается при самостоятельном разряде в газах, сравнительно невысока — порядка 10^3 — 10^4 К. Это так называемая *холодная* плазма. Светящийся столб тлеющего разряда, канал искрового разряда и светящиеся газы электрической дуги как раз и представляют собой холодную плазму.

Горячая плазма. Плазма может возникать не только при электрическом разряде в газах. Создать условия для ионизации атомов при их столкновениях можно, нагревая газ до очень высокой температуры. Нетрудно рассчитать эту температуру. Известно, что энергия ионизации $W_{\text{и}}$, например, атома водорода равна 13,5 эВ, или $2,16 \cdot 10^{-18}$ Дж. Ионизация может произойти, если кинетическая энергия атомов $\left(\frac{m_0 v^2}{2} = \frac{3}{2} kT \right)$ больше или равна энергии ионизации:

$$\frac{3}{2} kT \geq W_{\text{и}}.$$

Отсюда

$$T \geq \frac{2W_{\text{и}}}{3k}, \quad T \geq \frac{2 \cdot 2,16 \cdot 10^{-18} \text{ Дж}}{3 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}} \approx 10^5 \text{ К}.$$

Плазма, которая возникает при столь высоких температурах, называется *горячей* плазмой.

Значит, водород при температуре 100 000 К и выше представляет собой горячую плазму.

При температуре порядка 10^6 — 10^7 К любое вещество находится в состоянии плазмы. Все звезды, в том числе и Солнце, состоят из плазмы, так как в их недрах температура достигает десятков и сотен миллионов кельвин. При таких температурах газ полностью ионизован. Он состоит из ядер атомов и отделившихся от них электронов.

В горячей плазме ядра обладают настолько большой кинетической энергией, что могут преодолеть значительные силы отталкивания, возникающие при их сближении. В результате столкновения ядер друг с другом образуются новые частицы, и при этом выделяется огромная энергия. Столкновение ядер с образованием новых частиц и выделением значительной энергии носит название реакции *термоядерного синтеза*. Изучение *горячей* плазмы потому и представляет такой большой интерес, что в ней возможны термоядерные реакции.

Температура в десятки и сотни миллионов кельвин, необходимая для «разжигания» плазмы, настолько грандиозна, что напрашивается вопрос, каким же образом она может быть достигнута. Оказывается, что в газовом разряде при напряжениях порядка 50 000 В частицы приобретают кинетическую энергию, соответствующую этой температуре. Следовательно, «поджечь» плазму можно газовым разрядом. Но ведь плазму необходимо

удержать в определенном объеме и изолировать от окружающей среды, чтобы она при своем возгорании до столь высокой температуры не теряла энергии. Разумеется, не существует «**вещественных**» сосудов, которые способны выдержать подобные температуры. Для этой цели используют магнитные поля, которые, действуя на движущиеся заряженные частицы, искривляют их траекторию, сжимают плазму и удерживают ее от столкновения со стенками сосуда.

Однако пока еще не удалось обеспечить теплоизоляцию плазмы в течение достаточного времени. Именно с этим связаны все трудности получения энергии при термоядерном синтезе.

Самое важное в двадцать первой главе

В металлах почти все атомы ионизованы. Поэтому концентрация электронов проводимости в них очень велика. Этим объясняется то, что металлы — хорошие проводники электрического тока. Электроны проводимости в металле можно рассматривать как своеобразный электронный газ.

Сила тока в проводнике может быть выражена через заряд частиц q_0 , создающих ток, концентрацию частиц n , среднюю скорость их упорядоченного движения $\bar{v}$ и площадь сечения проводника S : $I = q_0 n \bar{v} S$.

Сопротивление металлов в широких пределах прямо пропорционально абсолютной температуре. При температуре, близкой к абсолютному нулю, многие металлы становятся сверхпроводниками.

Имеются вещества — полупроводники, сопротивление которых резко изменяется под влиянием внешних воздействий — нагревания, освещения, а также благодаря введению некоторых примесей.

Эта особенность полупроводников позволяет использовать их в автоматике, где требуются устройства, очень чувствительные к изменению внешних воздействий.

В полупроводниках существуют два типа проводимости: электронная, осуществляемая электронами проводимости, и «дырочная», которая создается электронами, участвующими во взаимодействии между атомами.

Введением соответствующих примесей в полупроводник, например мышьяка или бора в германий или кремний, можно создать в нем преимущественно электронную (n -типа) или «дырочную» (p -типа) проводимость.

Контакт полупроводников n - и p -типа представляет собой диод, который хорошо проводит ток в одном направлении и почти не проводит в противоположном. Это свойство полупроводникового диода используется для выпрямления переменного тока.

Полупроводники с двумя n — p -переходами представляют собой полупроводниковый триод — транзистор. Транзисторы применяются в большинстве радиотехнических устройств.

Ток в вакууме может быть создан только в том случае, если в вакуум вводятся носители заряда. Для этого используется термоэлектронная эмиссия.

В электрическом поле между электродами электровакуумных приборов электроны, испускаемые накаливаемым катодом, летят, не испытывая столкновений, поэтому их скорость у анода достигает очень большого значения. Она в десятки миллиардов раз больше, чем скорость упорядоченного движения электронов в металле.

Ток через вакуумный диод проходит лишь в том случае, если накаливаемый электрод служит катодом, а холодный — анодом.

В электролитах носители тока — это положительные и отрицательные ионы. Они образуются при растворении в воде солей, кислот и оснований.

При прохождении тока через растворы электролитов вместе с зарядом переносится и вещество. Для электролитов справедлив закон Фарадея: масса вещества, выделившегося на электроде, прямо пропорциональна количеству электричества, прошедшего через раствор:

$$m = \frac{M}{N_A e Z} Q,$$

где M — молярная масса, N_A — постоянная Авогадро, e — заряд электрона, Z — валентность. Величина $k = \frac{M}{N_A e Z}$ — электрохимический эквивалент вещества.

Как и для металлов, для электролитов справедлив закон Ома.

Газы в обычных условиях не проводят электрический ток. Но под влиянием внешних воздействий (пламя, ультрафиолетовое и рентгеновское излучения и др.) происходит ионизация газов и в них появляются свободные носители заряда — электроны и ионы обоих знаков.

Ионизация газа возникает также при столкновениях электронов, которые всегда имеются в небольшом числе в газах, с нейтральными атомами и молекулами. Такая ионизация имеет место при высоких напряжениях. При этом число носителей заряда растет лавинообразно и электропроводность газа резко возрастает.

При атмосферном давлении возникают различные виды разрядов в газах, например искровой и дуговой разряды. Эти виды разрядов используются в технологических процессах обработки металлов (сварка, плавка, резание и др.).

В разреженных газах разряд происходит при более низких напряжениях, чем в газах при атмосферном давлении. Этот вид разряда называют тлеющим. Он применяется в рекламных трубках и лампах дневного света.

При больших концентрациях заряженных частиц (более 10^{18} частиц в 1 м^3) газ образует плазму. При температурах 10^6 — 10^7 К любое вещество находится в состоянии плазмы. Плазма — проводник электрического тока. В высокотемпературной плазме возможны термоядерные реакции, при которых выделяется значительная энергия.



1

Измерение ускорения тела при равноускоренном движении

Цель работы: вычислить ускорение, с которым скатывается шарик по наклонному желобу.

Для этого измеряют длину перемещения $\vec{s}$ шарика за известное время t . Так как при равноускоренном движении без начальной скорости $s = \frac{at^2}{2}$, то, измерив s и t , можно найти ускорение шарика. Оно равно: $a = \frac{2s}{t^2}$.

Никакие измерения не делаются абсолютно точно. Они всегда производятся с некоторой погрешностью, связанной с несовершенством средств измерения и другими причинами. Но и при наличии погрешностей имеется несколько способов проведения достоверных измерений. Наиболее простой из них — вычисление среднего арифметического из результатов нескольких независимых измерений одной и той же величины, если условия опыта не изменяются². Это и предлагается делать в работе.

Приборы и материалы: 1) измерительная лента; 2) метроном; 3) желоб; 4) шарик; 5) штатив с муфтами и лапой; 6) металлический цилиндр.

Порядок выполнения работы

1. Укрепите желоб с помощью штатива в наклонном положении под небольшим углом к горизонту (рис. 295). У нижнего конца желоба положите в него металлический цилиндр.

2. Пустив шарик (одновременно с ударом метронома) с верхнего конца желоба, подсчитайте число ударов метронома до столкновения шарика с цилиндром. Опыт удобно проводить при 120 ударах метронома в минуту.

3. Меняя угол наклона желоба к горизонту и производя небольшие перемещения металлического цилиндра, добивайтесь того, чтобы между моментом пуска шарика и моментом его столкновения с цилиндром было 4 удара метронома (3 промежутка между ударами).

4. Вычислите время движения шарика.

¹ В составлении инструкций к лабораторным работам принимали участие Ю. И. Дик и Г. Г. Никифоров.

² Проведение серии измерений и вычисление среднего арифметического из результатов этих измерений позволяет уменьшить только случайную ошибку, но не систематическую.

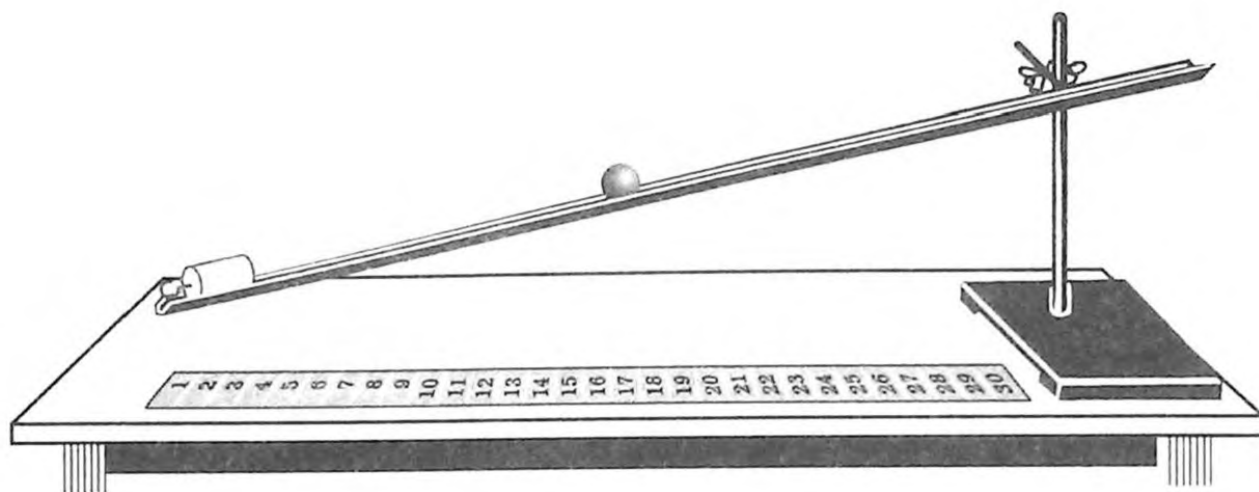


Рис. 295

5. С помощью измерительной ленты определите длину перемещения $\vec{s}$ шарика. Не меняя наклона желоба (условия опыта должны оставаться неизменными), повторите опыт пять раз, добиваясь снова совпадения четвертого удара метронома с ударом шарика о металлический цилиндр (цилиндр для этого можно немного передвигать).

6. По формуле $s_{\text{ср}} = \frac{s_1 + s_2 + s_3 + s_4 + s_5}{5}$ найдите среднее значение модуля перемещения, а затем рассчитайте среднее значение модуля ускорения: $a_{\text{ср}} = \frac{2s_{\text{ср}}}{t^2}$.

7. Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу:

Номер опыта	s , м	$s_{\text{ср}}$, м	Число ударов метронома	t , с	$a_{\text{ср}}$, м/с ²

2 Измерение жесткости пружины

Цель работы: найти жесткость пружины по измерениям удлинения пружины при различных значениях силы тяжести $\vec{F}_T = m\vec{g}$, уравновешивающей силу упругости $\vec{F}_{\text{упр}}$, на основе закона Гука: $k = \frac{F_{\text{упр}}}{|x|}$.

В каждом из опытов жесткость определяется при разных значениях силы упругости и удлинения, т. е. условия опыта меняются. Поэтому для нахождения среднего значения жесткости нельзя вычислить среднее арифметическое результатов измерений. Воспользуемся графическим способом нахождения среднего значения, который может быть применен в таких случаях. По результатам нескольких опытов построим график зависимости модуля силы упругости $F_{\text{упр}}$ от модуля удлинения $|x|$. При построении графика по результатам опытов экспериментальные точки могут не оказаться на прямой, которая соответствует формуле $F_{\text{упр}} = k|x|$. Это связано с погрешностями измерения. В этом случае график надо проводить так, чтобы примерно одинаковое число точек оказалось по разные стороны от

прямой. После построения графика возьмите точку на прямой (в средней части графика), определите по нему соответствующие этой точке значения силы упругости и удлинения и вычислите жесткость k . Она и будет искомым средним значением жесткости пружины $k_{\text{ср}}$.

Результат измерения обычно записывается в виде выражения $k = k_{\text{ср}} \pm \Delta k$, где Δk — наибольшая абсолютная погрешность измерения. Из курса алгебры (VII класс) известно, что относительная погрешность (ϵ_k) равна отношению абсолютной погрешности Δk к значению величины k : $\epsilon_k = \frac{\Delta k}{k}$, откуда $\Delta k = \epsilon_k k$. Существует правило для расчета относительной погрешности: если определяемая в опыте величина находится в результате умножения и деления приближенных величин, входящих в расчетную формулу, то относительные погрешности складываются. В данной работе $k = \frac{mg}{|x|}$. Поэтому

$$\epsilon_k = \epsilon_m + \epsilon_g + \epsilon_x \dots \quad (1)$$

Приборы и материалы: 1) набор грузов, масса каждого равна $m_0 = 0,100$ кг, а погрешность $\Delta m_0 = 0,002$ кг; 2) линейка с миллиметровыми делениями; 3) штатив с муфтами и лапкой; 4) спиральная пружина.

Порядок выполнения работы

1. Закрепите в лапке штатива конец спиральной пружины (другой конец пружины снабжен стрелкой-указателем и крючком) (рис. 296).

2. Рядом с пружиной или за ней установите и закрепите линейку с миллиметровыми делениями.

3. Отметьте и запишите то деление линейки, против которого находится стрелка-указатель пружины.

4. Подвесьте к пружине груз, масса которого известна, и измерьте вызванное им удлинение пружины.

5. К первому грузу добавьте второй, третий и т. д. грузы, записывая каждый раз удлинение $|x|$ пружины. По результатам измерений заполните таблицу:

Номер опыта	m , кг	mg^1 , Н	$ x $, м

6. По результатам измерений постройте график зависимости силы упругости от удлинения и, пользуясь им, определите среднее значение жесткости пружины $k_{\text{ср}}$.

7. Рассчитайте наибольшую относительную погрешность, с которой найдено значение $k_{\text{ср}}$ (из опыта с одним грузом). В формуле (1)

$$\epsilon_m = \frac{\Delta m}{m} = \frac{0,002 \text{ кг}}{0,100 \text{ кг}} = 0,02; \quad \epsilon_g = \frac{\Delta g}{g} = \frac{0,02 \text{ м/с}^2}{10 \text{ м/с}^2} = 0,002;$$

так как погрешность при измерении удлинения $\Delta x = 1$ мм, то

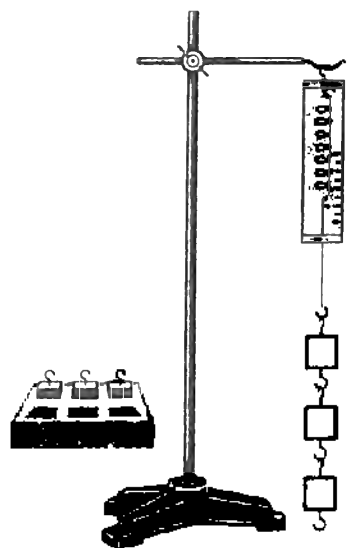


Рис. 296

¹ Принять $g \approx 10 \text{ м/с}^2$.

$$\epsilon_x = \frac{\Delta x}{x} = \frac{1 \text{ мм}}{25 \text{ мм}} = 0,04.$$

8. Найдите $\Delta k = \epsilon_k k_{\text{ср}}$ и запишите ответ в виде: $k = k_{\text{ср}} \pm \Delta k$.

3 Измерение коэффициента трения скольжения

Цель работы: определить коэффициент трения деревянного бруска, скользящего по деревянной линейке, используя формулу $F_{\text{тр}} = \mu P$.

С помощью динамометра измеряют силу, с которой нужно тянуть брусок с грузами по горизонтальной поверхности так, чтобы он двигался равномерно. Эта сила равна по модулю силе трения $F_{\text{тр}}$, действующей на брусок. С помощью того же динамометра можно найти вес бруска с грузом.

Этот вес по модулю равен силе нормального давления $\vec{N}$ бруска на поверхность, по которой он скользит. Определив таким образом значения силы трения при различных значениях силы нормального давления, необходимо построить график зависимости $F_{\text{тр}}$ от P и найти среднее значение коэффициента трения (см. лабораторную работу 2).

Основным измерительным прибором в этой работе является динамометр. Динамометр имеет погрешность $\Delta_d = 0,05 \text{ Н}$. Она и равна погрешности измерения, если указатель совпадает со штрихом шкалы. Если же указатель в процессе измерения не совпадает со штрихом шкалы (или колеблется), то погрешность измерения силы равна $\Delta F = 0,1 \text{ Н}$.

Приборы и материалы: 1) динамометр; 2) деревянный брусок; 3) деревянная линейка; 4) набор грузов.

Порядок выполнения работы

1. Положите брусок на горизонтально расположенную деревянную линейку. На брусок поставьте груз.

2. Прикрепив к бруску динамометр, как можно более равномерно тяните его вдоль линейки. Заметьте при этом показание динамометра.

3. Взвесьте брусок и груз.

4. К первому грузу добавьте второй, третий грузы, каждый раз взвешивая брусок и грузы и измеряя силу трения.

По результатам измерений заполните таблицу:

Номер опыта	P , Н	ΔP , Н	$F_{\text{тр}}$, Н	$\Delta F_{\text{тр}}$, Н

5. По результатам измерений постройте график зависимости силы трения от силы давления и, пользуясь им, определите среднее значение коэффициента трения $\mu_{\text{ср}}$ (см. лабораторную работу 2).

6. Рассчитайте максимальную относительную погрешность измерения коэффициента трения. Так как $\mu = \frac{F_{\text{тр}}}{P}$, то

$$\epsilon_{\mu} = \epsilon_{F_{\text{тр}}} + \epsilon_P = \frac{\Delta F_{\text{тр}}}{F_{\text{тр}}} + \frac{\Delta P}{P} \quad (1)$$

(см. формулу (1) лабораторной работы 2).

Из формулы (1) следует, что с наибольшей погрешностью измерен коэффициент трения в опыте с одним грузом (так как в этом случае знаменатели имеют наименьшее значение).

7. Найдите абсолютную погрешность $\Delta\mu = \varepsilon_\mu \mu_{\text{ср}}$ и запишите ответ в виде: $\mu = \mu_{\text{ср}} + \Delta\mu$.

4 Изучение движения тела, брошенного горизонтально

Цель работы: измерить начальную скорость, сообщенную телу в горизонтальном направлении при его движении под действием силы тяжести.

Если шарик брошен горизонтально, то он движется по параболе. За начало координат примем начальное положение шарика. Направим ось X горизонтально, а ось Y — вертикально вниз. Тогда в любой момент времени t $x = v_0 t$, а $y = \frac{gt^2}{2}$. Дальность полета l — это значение координаты x , которое она будет иметь, если вместо l подставить время падения тела с высоты h . Поэтому можно записать: $l = v_0 t$; $h = \frac{gt^2}{2}$. Отсюда легко найти время падения t и начальную скорость v_0 :

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}} \quad \text{и} \quad v_0 = \frac{l}{t}, \quad \text{или} \quad v_0 = l\sqrt{\frac{g}{2h}}.$$

Если несколько раз пускать шарик в неизменных условиях опыта (рис. 297), то значения дальности полета будут иметь некоторый разброс

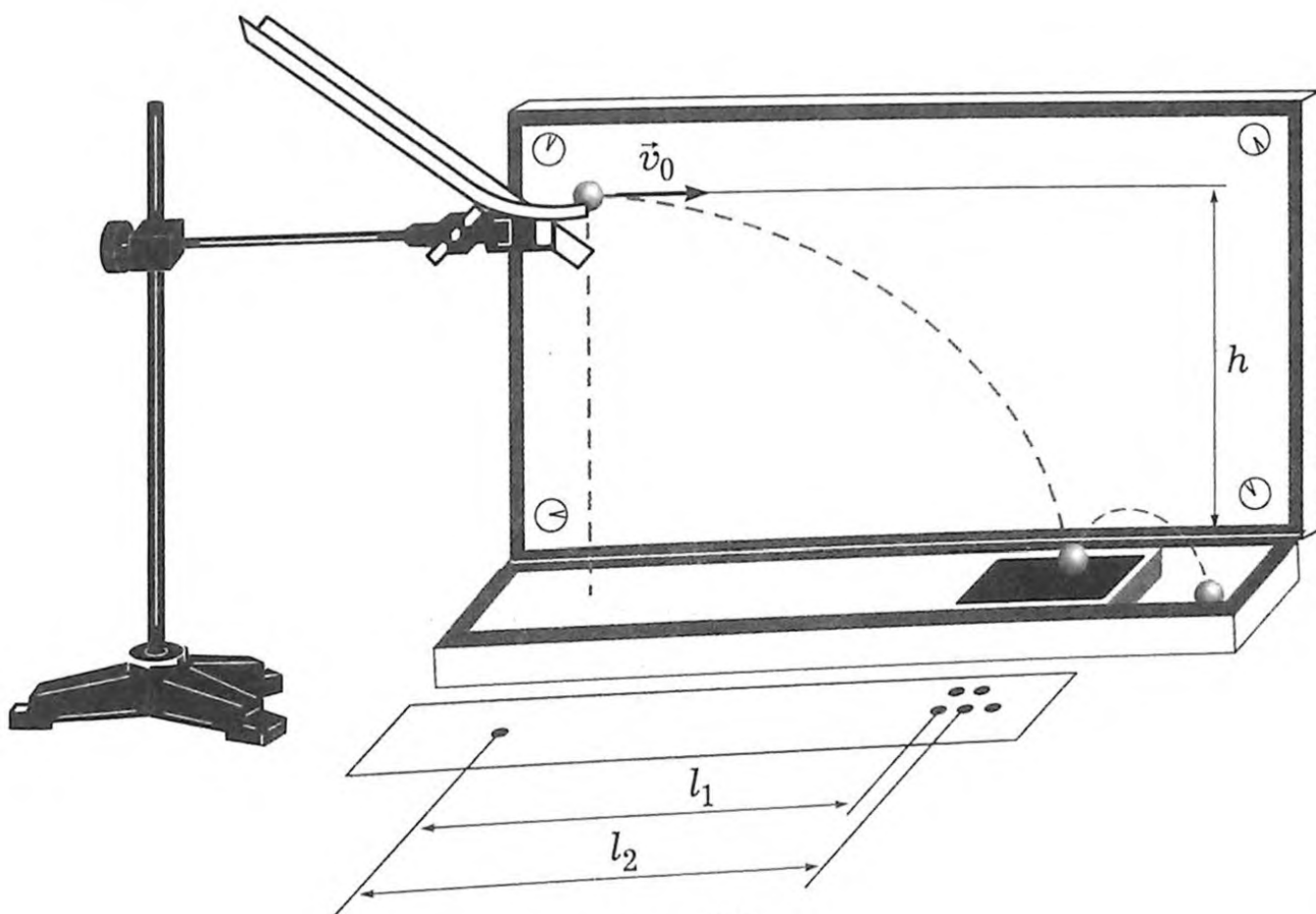


Рис. 297

из-за влияния различных причин, которые невозможно учесть. В таких случаях за значение измеряемой величины принимается среднее арифметическое результатов, полученных в нескольких опытах.

Приборы и материалы: 1) линейка с миллиметровыми делениями; 2) штатив с муфтой и лапкой; 3) лоток для пуска шарика; 4) фанерная доска; 5) шарик; 6) бумага; 7) кнопки; 8) копировальная бумага.

Порядок выполнения работы

1. С помощью штатива укрепите фанерную доску вертикально. При этом той же лапкой зажмите выступ лотка. Загнутый конец лотка должен быть горизонтальным (см. рис. 297).

2. Прикрепите к фанере кнопками лист бумаги шириной не менее 20 см и у основания установки на полоску белой бумаги положите копировальную бумагу.

3. Повторите опыт пять раз, пуская шарик из одного и того же места лотка, уберите копировальную бумагу.

4. Измерьте высоту h и дальность полета l . Результаты измерения занесите в таблицу:

Номер опыта	h , м	l , м	$l_{\text{ср}}$, м	$v_{0 \text{ ср}}$, м/с

5. Рассчитайте среднее значение начальной скорости по формуле

$$v_{0 \text{ ср}} = l_{\text{ср}} \sqrt{\frac{g}{2h}}.$$

6. Пользуясь формулами $x = v_{0 \text{ ср}} t$ и $y = \frac{gt^2}{2}$, найдите координату x тела (координата y уже подсчитана) через каждые 0,05 с и постройте траекторию движения на листе бумаги, прикрепленном к фанерной доске:

t , с	0	0,05	0,10	0,15	0,2
x , м	0				
y , м	0	0,012	0,049	0,110	0,190

7. Пустите шарик по желобу и убедитесь в том, что его траектория близка к построенной параболе.

5 Изучение движения тела по окружности под действием сил упругости и тяжести

Цель работы: убедиться в том, что при движении тела по окружности под действием нескольких сил их равнодействующая равна произведению массы тела на ускорение: $\vec{F} = m\vec{a}$.

Для этого используется конический маятник (рис. 298, а). На прикрепленное к нити тело (им в работе является груз из набора по механике) действуют сила тяжести $\vec{F}_1$ и сила упругости $\vec{F}_2$. Их равнодействующая равна $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$.

Сила $\vec{F}$ и сообщает грузу центростремительное ускорение $a = \frac{4\pi^2 r}{T^2}$, где r — радиус окружности, по которой движется груз, T — период его обращения.

Для нахождения периода удобно измерить время t определенного числа N оборотов. Тогда

$$T = \frac{t}{N} \quad \text{и} \quad a = \frac{4\pi^2 N^2}{t^2} r. \quad (1)$$

Модуль равнодействующей $\vec{F}$ сил $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ можно измерить, скомпенсировав ее силой упругости $\vec{F}_{\text{упр}}$ пружины динамометра так, как это показано на рисунке 298, б.

Согласно второму закону Ньютона, $\frac{F}{ma} = 1$. При подстановке в это равенство полученных в опыте значений $F_{\text{упр}}$, m и a может оказаться, что левая часть этого равенства отличается от единицы. Это и позволяет оценить погрешность эксперимента.

Приборы и материалы: 1) линейка с миллиметровыми делениями; 2) часы с секундной стрелкой; 3) динамометр; 4) штатив с муфтой и кольцом; 5) прочная нить; 6) лист бумаги с начерченной окружностью радиусом 15 см; 7) груз из набора по механике.

Порядок выполнения работы

1. Нить длиной около 45 см привяжите к грузу и подвесьте к кольцу штатива.

2. Один учащийся должен взяться двумя пальцами за нить у точки подвеса и привести во вращение маятник.

3. Другой учащийся должен измерить лентой радиус r окружности, по которой движется груз. (Окружность можно начертить заранее на бумаге и по этой окружности привести в движение маятник.)

4. Определите период T обращения маятника при помощи часов с секундной стрелкой.

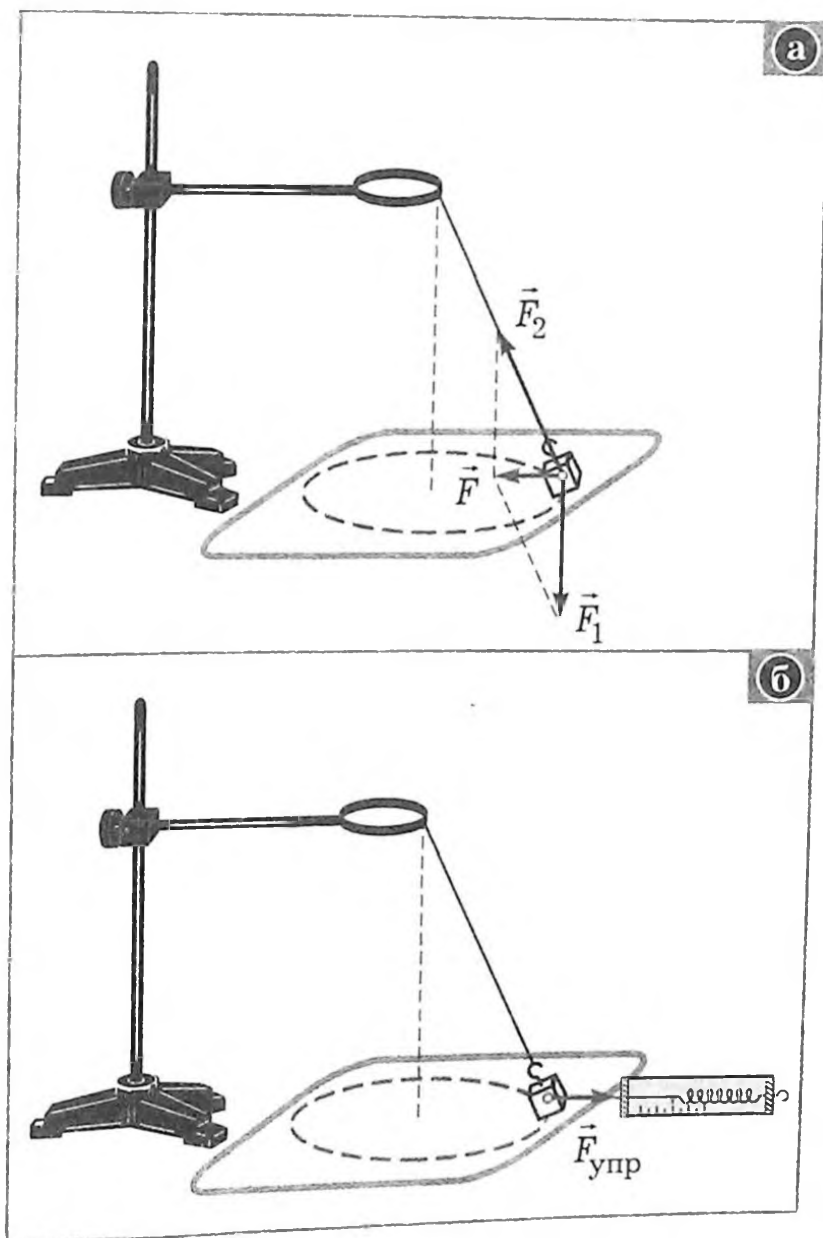


Рис. 298

Для этого учащийся, вращающий маятник, в такт с его оборотами произносит вслух: нуль, нуль и т. д. Второй учащийся с часами в руках, уловив по секундной стрелке удобный момент для начала отсчета, произносит: «нуль», после чего первый вслух считает число оборотов. Отсчитав 30—40 оборотов, фиксирует промежуток времени t . Опыт повторяют пять раз.

5. Рассчитайте среднее значение ускорения по формуле (1), учитывая, что с относительной погрешностью не более 0,015 можно считать $\pi^2 = 10$.

6. Измерьте модуль равнодействующей $\vec{F}$, уравновесив ее силой упругости пружины динамометра (см. рис. 298, б).

7. Результаты измерений занесите в таблицу:

Номер опыта	t , с	$t_{\text{ср}}$, с	N	m , кг	r , м	a , м/с ²	$F_{\text{упр}}$, Н

8. Сравните отношение $\frac{F_{\text{упр}}}{ma}$ с единицей и сделайте вывод о погрешности экспериментальной проверки того, что центростремительное ускорение сообщает телу векторная сумма действующих на него сил.

6 Изучение равновесия тел под действием нескольких сил

Цель работы: установить соотношение между моментами сил, приложенных к плечам рычага при его равновесии.

Для этого к одному из плеч рычага подвешивают один или несколько грузов, а к другому прикрепляют динамометр (рис. 299). С помощью этого динамометра измеряют модуль силы $\vec{F}$, которую необходимо приложить для того, чтобы рычаг находился в равновесии. Затем с помощью того же динамометра измеряют модуль веса грузов $\vec{P}$. Длины плеч рычага измеряют с помощью линейки. После этого определяют абсолютные значения моментов

M_1 и M_2 сил $\vec{P}$ и $\vec{F}$: $M_1 = Pl_1$ и $M_2 = Fl_2$.

Вывод о погрешности экспериментальной проверки правила моментов можно сделать, сравнив с единицей отношение: $\frac{M_1}{M_2}$.

Приборы и материалы: 1) линейка; 2) динамометр; 3) штатив с муфтой; 4) рычаг; 5) набор грузов.

Порядок выполнения работы

1. Установите рычаг на штатив и уравновесьте его в горизонтальном положении с помощью расположенных на его концах передвигных гаек.

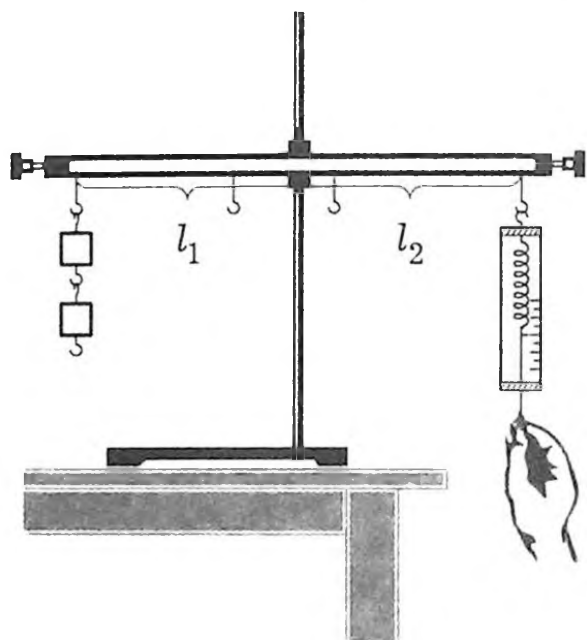


Рис. 299

2. Подвесьте в некоторой точке одного из плеч рычага груз.
3. Прикрепите к другому плечу рычага динамометр и определите силу, которую необходимо приложить к рычагу для того, чтобы он находился в равновесии.
4. Измерьте с помощью линейки длины плеч рычага.
5. С помощью динамометра определите вес груза $\vec{P}$.
6. Найдите абсолютные значения моментов сил $\vec{P}$ и $\vec{F}$.
7. Найденные величины занесите в таблицу:

$l_1, \text{ м}$	$l_2, \text{ м}$	$P, \text{ Н}$	$F, \text{ Н}$	$M_1 = Pl_1, \text{ Н} \cdot \text{ м}$	$M_2 = Fl_2, \text{ Н} \cdot \text{ м}$

8. Сравните отношение $\frac{M_1}{M_2}$ с единицей и сделайте вывод о погрешности экспериментальной проверки правила моментов.

7 Изучение закона сохранения механической энергии

Цель работы: сравнить две величины — уменьшение потенциальной энергии прикрепленного к пружине тела при его падении и увеличение потенциальной энергии растянутой пружины.

Приборы и материалы: 1) динамометр, жесткость пружины которого равна 40 Н/м; 2) линейка измерительная; 3) груз из набора по механике; масса груза равна $0,100 \pm 0,002$ кг; 4) фиксатор; 5) штатив с муфтой и лапкой.

Для работы используется установка, показанная на рисунке 300. Она представляет собой укрепленный на штативе динамометр с фиксатором 1. Пружина динамометра заканчивается проволочным стержнем с крючком. Фиксатор (в увеличенном масштабе он показан отдельно) — это легкая пластинка из пробки (размерами $5 \times 7 \times 1,5$ мм), прорезанная ножом до ее центра. Ее насаживают на проволочный стержень динамометра. Фиксатор должен перемещаться вдоль стержня с небольшим трением, но трение все же должно быть достаточным, чтобы фиксатор сам по себе не падал вниз. В этом нужно убедиться перед началом работы. Для этого фиксатор устанавливают у нижнего края шкалы на ограничительной скобе. Затем растягивают и отпускают.

Фиксатор вместе с проволочным стержнем должен подняться вверх, отмечая

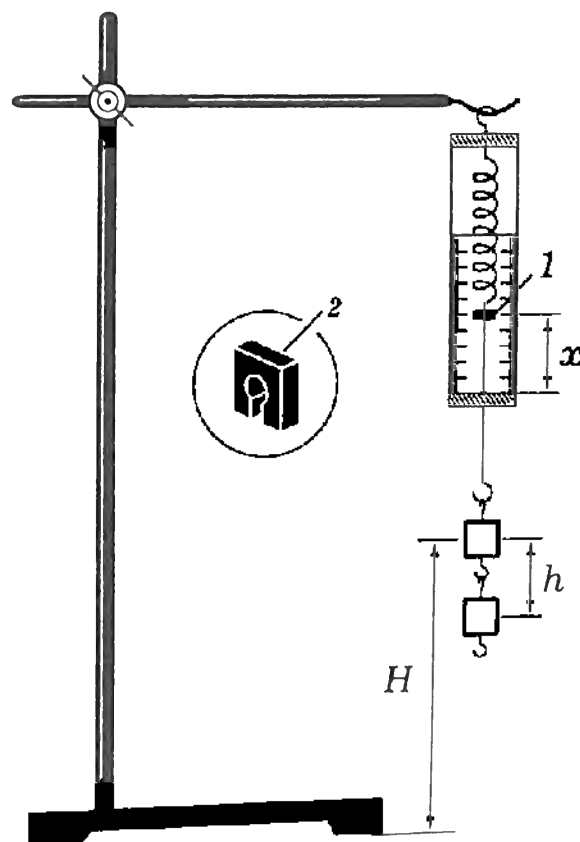


Рис. 300

этим максимальное удлинение пружины, равное расстоянию от упора до фиксатора.

Если поднять груз, висящий на крючке динамометра, так, чтобы пружина не была растянута, то потенциальная энергия груза по отношению, например, к поверхности стола равна mgH . При падении груза (опускание на расстояние $x = h$) потенциальная энергия груза уменьшится на $E_1 = mgh$, а энергия пружины при ее деформации увеличивается на $E_2 = \frac{kx^2}{2}$.

Порядок выполнения работы

1. Груз из набора по механике прочно укрепите на крючке динамометра.
2. Поднимите рукой груз, разгружая пружину, и установите фиксатор внизу у скобы.
3. Отпустите груз. Падая, груз растянёт пружину. Снимите груз и по положению фиксатора измерьте линейкой максимальное удлинение $x_{\max}$ пружины.
4. Повторите опыт пять раз.
5. Подсчитайте $E_{1\text{ср}} = mgh_{\text{ср}}$ и $E_{2\text{ср}} = \frac{kx_{\text{ср}}^2}{2}$.
6. Результаты занесите в таблицу:

Номер опыта	$x_{\max}$, м	$x_{\text{ср}} = h_{\text{ср}}$	$E_{1\text{ср}}$, Дж	$E_{2\text{ср}}$, Дж	$\frac{E_{1\text{ср}}}{E_{2\text{ср}}}$

7. Сравните отношение $\frac{E_{1\text{ср}}}{E_{2\text{ср}}}$ с единицей и сделайте вывод о погрешности, с которой был проверен закон сохранения энергии.

8 Измерение ускорения свободного падения с помощью маятника

Цель работы: вычислить ускорение свободного падения из формулы для периода колебаний математического маятника:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}. \quad (1)$$

Для этого необходимо измерить период колебания и длину подвеса маятника. Тогда из формулы (1) можно вычислить ускорение свободного падения:

$$g = \frac{4\pi^2}{T^2} l. \quad (2)$$

Приборы и материалы: 1) часы с секундной стрелкой; 2) измерительная лента ($\Delta_l = 0,5$ см); 3) шарик с отверстием; 4) нить; 5) штатив с муфтой и кольцом.

Порядок выполнения работы

1. Установите на краю стола штатив. У его верхнего конца укрепите при помощи муфты кольцо и подвесьте к нему шарик на нити. Шарик должен висеть на расстоянии 3—5 см от пола.

2. Отклоните маятник от положения равновесия на 5—8 см и отпустите его.

3. Измерьте длину подвеса мерной лентой.

4. Измерьте время Δt сорока полных колебаний ($N = 40$).

5. Повторите измерения Δt (не изменяя условий опыта) и найдите среднее значение $\Delta t_{\text{ср}}$.

6. Вычислите среднее значение периода колебаний $T_{\text{ср}}$ по среднему значению $\Delta t_{\text{ср}}$.

7. Вычислите значение $g_{\text{ср}}$ по формуле:

$$g_{\text{ср}} = \frac{4\pi^2}{T_{\text{ср}}^2} l. \quad (3)$$

8. Полученные результаты занесите в таблицу:

Номер опыта	l , м	N	Δt , с	$\Delta t_{\text{ср}}$, с	$T_{\text{ср}} = \frac{\Delta t_{\text{ср}}}{N}$	$g_{\text{ср}}$, $\frac{\text{м}}{\text{с}^2}$

9. Сравните полученное среднее значение $g_{\text{ср}}$ со значением $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ и рассчитайте относительную погрешность измерения по формуле:

$$\varepsilon_g = \frac{|g_{\text{ср}} - g|}{g}.$$

9

Изучение изотермического процесса изменения состояния газа

Цель работы: проверить постоянство произведения объема газа на его давление в условиях, когда температура и масса газа не меняются.

Приборы и материалы: 1) стеклянная трубка длиной 30—40 см и диаметром 8—10 см, запаянная с одного конца; 2) цилиндрический сосуд длиной 40—50 см и диаметром 4—5 см; 3) линейка с миллиметровыми делениями; 4) штатив; 5) барометр (один на весь класс).

Порядок выполнения работы

1. Наполните укрепленный на штативе цилиндрический сосуд водой.

2. Измерьте при помощи барометра атмосферное давление.

3. Измерьте объем воздуха в стеклянной трубке (в условных единицах по делениям линейки).

4. Найдите произведение давления воздуха на его объем.

5. Опустите в сосуд с водой стеклянную трубку запаянным концом вверх.

6. Измерьте новый объем воздуха в трубке.

7. Измерьте разность уровней воды в сосуде и трубке.

8. Рассчитайте новое давление воздуха в трубке.

9. Вычислите произведение давления воздуха на его объем.

10. Повторите эксперимент несколько раз. Результаты измерений занесите в таблицу:

Номер опыта	p , Па	V , м ³	$p \cdot V$, Па · м ³

11. Сравните полученные результаты и убедитесь в справедливости закона Бойля — Мариотта.

10 Определение поверхностного натяжения жидкости

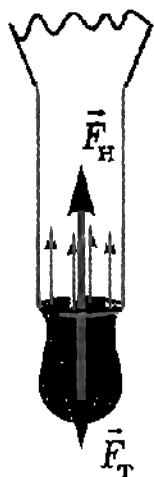


Рис. 301

Цель работы: измерить поверхностное натяжение воды.

Наблюдая за каплями воды, вытекающей из тонкой трубки, можно заметить, что отрыв капли происходит после того, как ее радиус станет равным внешнему радиусу трубки (рис. 301). Рассмотрим равновесие готовой оторваться капли.

На такую каплю действует сила тяжести $\vec{F}_t = m\vec{g}$, которая направлена вниз (m — масса капли). Эта сила уравнивается силой поверхностного натяжения $\vec{F}_n$, действующей на границе стекла с жидкостью. Модуль этой силы равен:

$$F_n = 2\pi r\sigma,$$

где r — радиус капли, σ — поверхностное натяжение. При равновесии капли $F_n = F_t$, или $2\pi r\sigma = mg$.

Отсюда

$$\sigma = \frac{mg}{2\pi r}.$$

Измерить массу одной оторвавшейся капли трудно. Зато можно определить массу M большого числа N оторвавшихся капель, упавших в стаканчик. Их размеры и массы практически одинаковы. Тогда

$$m = \frac{M}{N} \text{ и } \sigma = \frac{Mg}{N\pi D}. \quad (1)$$

Приборы и материалы: 1) весы учебные со штативом и гирями; 2) штангенциркуль; 3) клин измерительный; 4) колба коническая; 5) стакан; 6) воронка, соединенная со стеклянным краном, имеющим наконечник.

Порядок выполнения работы

1. При помощи штангенциркуля и измерительного клина измерьте диаметр канала наконечника ($D = 2r$).

2. Укрепите воронку в штативе и заполните ее водой.

3. Взвесьте химический стакан.

4. Открыв кран, добейтесь медленного падения капель. Подставив стакан, отсчитайте 40—50 капель.

5. Взвешивая вторично стакан, определите массу воды.

6. Вычислите поверхностное натяжение воды по формуле (1).

7. Определите погрешность вычисления σ .

При определении погрешности следует иметь в виду, что наибольшую погрешность дает измерение диаметра D канала трубки. Оно в основном определяет максимальную относительную погрешность ε вычисления поверхностного натяжения σ .

Поэтому

$$\varepsilon = \frac{\Delta\sigma}{\sigma} = \frac{\Delta D}{D}.$$

С учетом абсолютной погрешности $\Delta\sigma$ значение поверхностного натяжения будет

$$\sigma \pm \Delta\sigma = \sigma (1 \pm \varepsilon).$$

11 Определение модуля упругости резины

Цель работы: определить величину, характеризующую упругие свойства — модуль Юнга.

Согласно закону Гука при деформации Δl упругого тела длиной l_0 и площадью сечения S возникает сила упругости $\vec{F}_{\text{упр}}$, равная по модулю

$$F_{\text{упр}} = \frac{ES}{l_0} |\Delta l|, \quad (1)$$

где E — модуль Юнга вещества, из которого сделано деформируемое тело.

Если $F_{\text{упр}}$, S , l_0 и Δl известны, то из формулы (1) можно определить модуль Юнга:

$$E = \frac{l_0 F_{\text{упр}}}{S |\Delta l|}. \quad (2)$$

Приборы и материалы: 1) резиновый жгут с петелькой на одном конце; 2) динамометр; 3) штатив; 4) линейка с миллиметровыми делениями; 5) штангенциркуль.

Порядок выполнения работы

1. С помощью штангенциркуля измерьте линейные размеры поперечного сечения жгута и вычислите его площадь.

2. Укрепите свободный конец жгута в штативе и измерьте его длину от нижней кромки лапки штатива до петли.

3. Крючок динамометра зацепите за петлю жгута и растяните жгут на 2 см.

4. Измерьте новую длину жгута и силу упругости, которая возникает при растяжении.

5. Вычислите модуль Юнга резины по формуле (2).

6. Указанные измерения произведите три раза, меняя удлинение жгута.

7. По результатам трех измерений вычислите среднее значение модуля Юнга.

12 Определение ЭДС и внутреннего сопротивления источника тока

Цель работы: измерить ЭДС и внутреннее сопротивление гальванического элемента или аккумулятора.

ЭДС $\mathcal{E}$ источника можно измерить с помощью вольтметра, сопротивление которого значительно больше внутреннего сопротивления r источника.

Внутреннее сопротивление источника тока можно определить на основании закона Ома, измерив напряжение U на резисторе с известным сопротивлением R , подключенным к источнику.

Так как

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}, \quad \text{то} \quad r = \frac{\mathcal{E} - IR}{I} = \frac{\mathcal{E} - U}{I}.$$

Приборы и материалы: 1) амперметр; 2) вольтметр; 3) батарея аккумуляторов; 4) реостат; 5) ключ для замыкания тока; 6) соединительные провода.

Порядок выполнения работы

1. Соберите цепь по схеме, представленной на рисунке 302.

2. Снимите показания вольтметра при разомкнутом выключателе.

3. Замкните цепь и с помощью реостата отрегулируйте силу тока так, чтобы стрелка амперметра установилась против целого деления шкалы амперметра.

4. Запишите значение силы тока и напряжения на внешнем участке цепи.

5. Вычислите напряжение на внутреннем участке цепи $U_{\text{вн}} = \mathcal{E} - U$.

6. Вычислите сопротивление источника тока $r = \frac{U_{\text{вн}}}{I}$.

7. Считая, что при измерениях силы тока и напряжения максимальные абсолютные погрешности равны $\Delta I = 0,005 \text{ А}$ и $\Delta U = 0,1 \text{ В}$ (половина деления шкалы прибора), определите максимальную относительную погрешность результата:

$$\mathcal{E} = \frac{\Delta r}{r} = \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta U_{\text{вн}}}{U_{\text{вн}}}.$$

8. Найдите максимальную абсолютную погрешность $\Delta r = r\mathcal{E}$.

9. Запишите значение внутреннего сопротивления источника с учетом погрешности измерения: $r + \Delta r$.

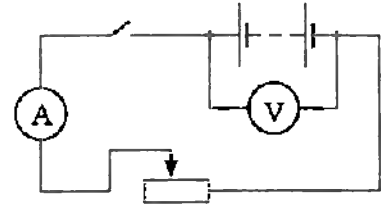


Рис. 302

13 Определение удельного сопротивления проводника

Цель работы: определить удельное сопротивление материала проводника.

Так как сопротивление R проводника длиной l и сечением S вычисляется по формуле $R = \frac{\rho l}{S}$, то $\rho = \frac{RS}{l}$.

Длину и диаметр проводника можно измерить с помощью линейки и штангенциркуля, а сопротивление R вычислить, измерив напряжение U на проводнике и силу тока I в нем: $R = \frac{U}{I}$.

Это позволит экспериментально найти удельное сопротивление материала проводника.

Приборы и материалы: 1) амперметр; 2) вольтметр; 3) лента измерительная; 4) штангенциркуль; 5) батарея аккумуляторов; 6) прово-

лока из материала с большим удельным сопротивлением; 7) ключ для замыкания электрической цепи; 8) провода соединительные.

Порядок выполнения работы

1. Измерьте лентой длину проволоки.
2. Измерьте штангенциркулем диаметр проволоки и рассчитайте площадь ее сечения.
3. Соберите цепь, соединив последовательно батарею аккумуляторов, проволоку, амперметр и ключ.
4. Параллельно проволоке подключите вольтметр.
5. Замкните цепь и запишите показания приборов.
6. По полученным результатам вычислите сопротивление проводника, а затем удельное сопротивление материала этого проводника.
7. Опыт повторите несколько раз, найдите среднее значение удельного сопротивления и ошибку измерения.

14 Наблюдение действия магнитного поля на ток

Цель работы: определить направление движения рамки с током в магнитном поле при различных условиях.

Приборы и материалы: 1) батарея аккумуляторов; 2) дугообразный магнит; 3) штатив; 4) ключ для замыкания электрической цепи; 5) катушка; 6) провода соединительные.

Порядок выполнения работы

1. Подвесьте катушку к лапке штатива и через выключатель соедините с батареей аккумуляторов.
2. Расположите магнит сначала северным полюсом (рис. 303) внутрь катушки, а затем южным.
3. В отчете по работе сделайте рисунки магнита и катушки и укажите на них направление линии магнитной индукции и направление тока в катушке при замыкании цепи.
4. Определите предполагаемое направление движения катушки для обоих случаев и укажите его на каждом рисунке.
5. Проверьте на опыте правильность предположения о направлении движения катушки.
6. Повторите те же опыты, изменив направление тока в катушке, и на соответствующих рисунках укажите предполагаемое направление движения катушки.

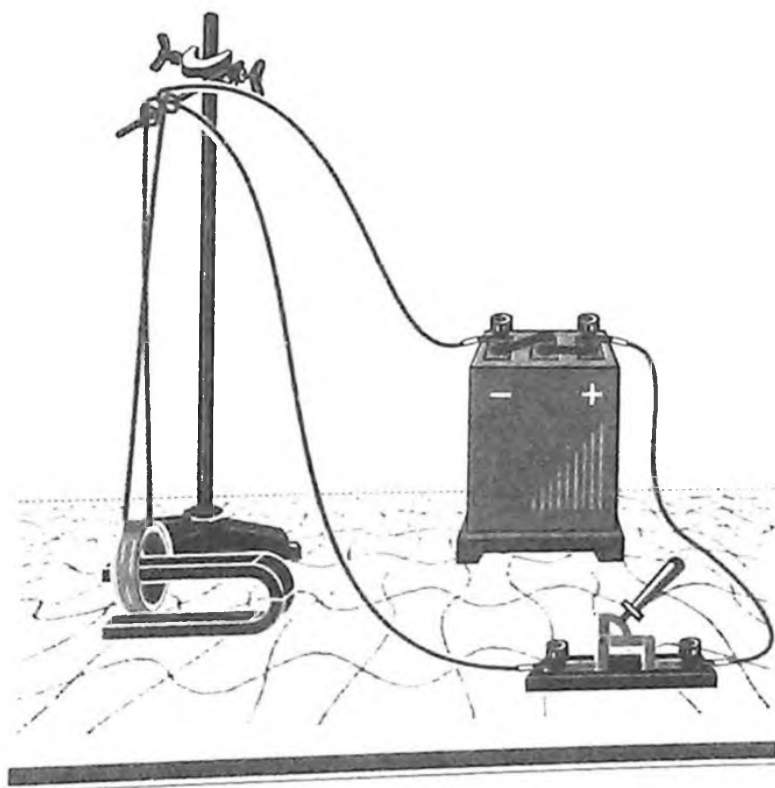


Рис. 303



Ответы к упражнениям

Упражнение 1. 1. $\approx 6,7$ м/с²; 750 м. 2. 0,6 м. 3. 2,4 км. 4. 1,27 м; 4 с; 8 м. 5. В момент времени, соответствующий точке А: $v_{1x} = v_{2x} = 2$ м/с; $v_{3x} = 0,5$ м/с и точке В: $v_{1x} = v_{3x} = 2$ м/с; $v_{2x} = 8$ м/с; $a_{1x} = 0$; $a_{2x} = 2$ м/с²; $a_{3x} = 0,5$ м/с². 6. $a_{1x} = 1$ м/с²; $a_{2x} = 0,5$ м/с²; $a_{3x} = -0,5$ м/с². 7. а) $OA = 9$ м/с; $OB = 3$ м/с; $OC = 5$ с; б) $a_{1x} = a_{2x} = 1$ м/с²; $a_{3x} = -1,8$ м/с². 8. ≈ 143 м; $t \approx 86$ с. 9. $t \approx 115$ с. 10. $\approx 3,1$ м/с. 11. $\approx 2,3$ м/с². 12. $\approx 7,8$ км/с. 13. ≈ 19 м/с. 14. $\approx 2,7 \cdot 10^{-3}$ м/с².

Упражнение 2. 1. 4 кН. 2. Нет. 3. 0,25 м/с²; 0,2 м/с². 4. $\approx 3,7$ м/с². 5. 78 м; 39 м/с². 6. 75 м; 10 м/с; 10 м/с. 7. 4900 Н во всех случаях. 8. а) 1010 Н; б) 980 Н; в) 940 Н; г) 0. 9. На 5600 Н. 10. 9,80 Н; $\approx 9,77$ Н. 11. 2,8 м. 12. 4700 км. 13. 10 м/с. 14. $\approx 3,4$ с; ≈ 34 м. 15. 5,5 м/с². 16. ≈ 16 Н.

Упражнение 3. 1. 20 000 кг · м/с. 2. 3,4 с. 3. 0,3 м/с. 4. 4,5 кг. 5. 500 Дж; $\approx 0,66$. 6. $-1,1 \cdot 10^5$ Дж; $1,1 \cdot 10^5$ Дж. 7. ≈ 16 Дж. 8. 8 Дж. 9. 2000 м. 10. 230 кг. 11. 0,01 м. 12. 20 кВт. 13. 20%.

Упражнение 4. 1. 3 Гц. 2. 30 Н/м. 3. 0,02 кг.

Упражнение 5. 1. 1,25 с; 0,8 Гц. 2. $\approx 0,05$ Гц; 8,5 м. 3. 0,2 Гц. 4. ≈ 9 м.

Упражнение 6. 1. Нет. 2. 72 км/ч.

Упражнение 7. 1. $\approx 3,3$ м/с. 2. 2 м. 3. 10 м.

Упражнение 8. 1. 48; 36; 98. 2. $7,97 \cdot 10^{-26}$ кг; $5,97 \cdot 10^{-26}$ кг; $1,63 \cdot 10^{-25}$ кг. 3. $5,31 \cdot 10^{-25}$ кг.

Упражнение 9. 1. $1,6 \cdot 10^7$. 2. 22,72 моль. 3. 1 моль; 1 моль. 4. $2,1 \cdot 10^{25}$. 5. 0,96 кг.

Упражнение 10. 1. $5,36 \cdot 10^7$. 2. $\approx 1,4 \cdot 10^{-10}$ м. 3. $2,8 \cdot 10^{-24}$ м³. 4. $\approx 3,3 \cdot 10^{19}$.

Упражнение 11. 1. $7 \cdot 10^{22}$. 2. $3 \cdot 10^{25}$.

Упражнение 12. 1. $\approx 2,4 \cdot 10^5$ м²/с². 2. $2,5 \cdot 10^{-19}$ Дж.

Упражнение 13. 1. $6,4 \cdot 10^{-21}$ Дж. 2. $\approx 4,14 \cdot 10^{-23}$ Дж. 3. $2,07 \cdot 10^{-20}$ Дж; $2,07 \cdot 10^{-17}$ Дж; $2,07 \cdot 10^{-14}$ Дж. 4. $1,37 \cdot 10^{-23}$ Дж/К. 5. $5,3 \cdot 10^{14}$ К. 6. $4,14 \cdot 10^{-16}$ Дж.

Упражнение 14. 1. Увеличилось в 2 раза. 2. $2,65 \cdot 10^{25}$. 3. $6 \cdot 10^4$ Па. 4. $4 \cdot 10^5$ Па. 5. ≈ 146 см³. 6. 15 кг; 125 кг/м³. 7. 2,24 л. 8. $\approx 5,15 \cdot 10^{18}$ кг.

Упражнение 15. 1. Нет; 0,66 кг/м³. 2. 40,7 кПа; нет; 48 кПа.

Упражнение 16. 1. 18 гПа; 16 °С. 2. Да. 3. 46%.

Упражнение 17. 1. 1552 кДж. 2. ≈ 26 МДж.

Упражнение 18. 1. $\approx 1,4 \cdot 10^{-5}$ Дж. 2. $\approx 9,2 \cdot 10^{-21}$ Дж; $\approx 1,5$. 3. Уменьшится на $5r^2$. 4. $\approx 0,4$; 1,6.

Упражнение 19. 1. 0,73 м. 2. 0,063 Дж/м². 3. $\approx 6 \cdot 10^{-2}$ м.

Упражнение 20. 1. 840 МДж. 2. 159,7 кДж. 3. ≈ 80 К.

Упражнение 21. 1. $\approx 5,6$ мм; $\approx 0,56\%$. 2. $\approx 1,48$ мм. 3. $2,28 \cdot 10^4$ Н.

- Упражнение 22. 1. ≈ 5 кДж. 2. $\approx 62,3$ Дж. 3. 250 кДж.
- Упражнение 23. 1. 1,93 кДж.
- Упражнение 24. 1. 30 Дж. 2. ≈ 450 Дж. 3. $\approx 2,1$ кДж; 4. $\approx 5,67$ кДж; $\approx 2,27$ кДж.
- Упражнение 25. 1. 2,5R. 2. а) ≈ 5 кДж; б) $\approx 8,3$ кДж.
- Упражнение 26. 1. 0,11. 2. 0,64. 3. $\approx 6,3 \cdot 10^6$ Дж.
- Упражнение 27. 1. $\approx 4,2 \cdot 10^{42}$. 2. $r_1 = 2r$. 3. 0,064 Н. 4. $\text{кг} \cdot \text{м}^3 / (\text{А}^2 \cdot \text{с}^4)$.
- Упражнение 28. 1. 75 Н/Кл; 1,1 м. 2. $\frac{8kq}{a^2}, \frac{32kq}{9a^2}, \frac{32kq}{9a^2}$. 3. 0.
4. $1,44 \cdot 10^{11}$ Н/Кл; $\approx 2,3 \cdot 10^{-8}$ Н. 5. $\text{кг} \cdot \text{м} / (\text{А} \cdot \text{с}^3)$.
- Упражнение 29. 1. ≈ 4520 ; $4 \cdot 10^{-8}$ Кл. 2. 113 000.
- Упражнение 30. 1. $1,2 \cdot 10^9$ В. 2. 10^6 В/м. 3. $6 \cdot 10^3$ В.
- Упражнение 31. 1. 1210 Дж; -1320 Дж. 2. $q\phi$; энергия отрицательна.
3. $7,34 \cdot 10^4$ В.
- Упражнение 32. 1. $4,8 \cdot 10^{-5}$ Кл. 2. 3,54 пФ.
- Упражнение 33. 1. $3,6 \cdot 10^{-4}$ Дж; 5 мкФ; увеличится в 3 раза. 2. $\approx 113 \text{ см}^2$; $2,5 \cdot 10^{-4}$ мкФ; $2 \cdot 10^{-5}$ Дж.
- Упражнение 34. 1. $\epsilon = 25$. 2. Увеличится до 3200 В.
- Упражнение 35. 1. 2 Ом. 2. 5 В; 0,5 А. 3. 17 В. 4. 5 В. 5. 10 Ом.
6. 9 В; 3 Ом. 7. 20 В. 8. 2 мА; 200 мА. 9. 5 МОм. 10. Уменьшилось.
11. В 1,5 раза. 12. 300 А.
- Упражнение 36. 1. 3 А. 2. 300 А; в 1200 раз больше. 3. 3,8 В; 1,5 Ом.
4. $I_1 = 0$; $U_1 = \mathcal{E} = 6$ В; $I_2 = 1,2$ А; $U_2 = 4,2$ В; $I_3 = 4$ А; $U_3 = 0$. 6. ≈ 5 Ом.
8. $0,24 \text{ мм}^2$.
- Упражнение 37. 1. 0,025 Ом. 2. $\approx 1,3 \cdot 10^4$ Ом; в 20 раз.
- Упражнение 38. 1. $\mathcal{E}_2/\mathcal{E}_1 = r_2/r_1$. 2. $I_1 = \mathcal{E}_1/r_1$; $I_2 = \mathcal{E}_2/r_2$;
 $I_{AB} = \mathcal{E}_1/r_1 - \mathcal{E}_2/r_2$. 3. 3 Ом; 0,5 А; 0,5 А. 4. 0,7 А; 0,8 А; 1,5 А. 5.

$$\frac{\mathcal{E}_2 r_1 - \mathcal{E}_1 r_2}{Rr_1 + r_2 r_1 + Rr_2}$$
- Упражнение 39. 1. 9,6 В; 1,6 А. 2. 0,45 В; 0,5 Вт.
- Упражнение 40. 1. $2 \cdot 10^{-7}$ Тл. 2. $3 \cdot 10^{-5}$ Тл.
- Упражнение 41. 1. $\approx 0,006$ Вб. 2. 0. 3. 0,015 Вб.
- Упражнение 42. 1. 30° . 2. 0,05 Н. 3. 0,018 Н · м. 4. 0,05 Н · м.
5. 0,05 Н · м.
- Упражнение 43. 1. $16 \cdot 10^{-12}$ Н; $\approx 2,2$ мм. 2. $9 \cdot 10^{-14}$ Н; $5,6 \cdot 10^{-3}$ Тл.
3. 16 см; $6,5 \cdot 10^{-8}$ с; нет.
- Упражнение 44. 1. 0,003 Вб/с. 2. $7,5 \cdot 10^{-2}$ А.
- Упражнение 45. 1. $\approx 0,87$ мм; $1,5 \cdot 10^9$ м. 2. $6,25 \cdot 10^{-4}$ м/с.
- Упражнение 46. 1. $\approx 8 \cdot 10^5$ м/с; $\approx 1,2 \cdot 10^6$ м/с.
- Упражнение 47. 1. $\approx 5 \cdot 10^7$ м/с. 2. ≈ 28 В.
- Упражнение 48. 1. $1,12 \cdot 10^{-6}$ кг/Кл. 2. $\approx 0,4$ кг. 3. $\approx 2,2 \cdot 10^3$ с.
4. $3,2 \cdot 10^{-7}$ кг/Кл.



- Авогадро А.* 65
Автоколебания 47
Ампер А. 244
Ампер 244
Анизотропия 122
Атомная единица массы 63
- Больцман Л.* 80
Броуновское движение 61
- Вебер 251
Величины
— векторные 5
— инвариантные 9
— относительные 8
— скалярные 5
Вес 19
Влажность относительная 98
Волна 50
Вольт 195
Вольт-амперная характеристика
 вакуумного диода 295
— — газового разряда 305
— — металлов 276
Вынужденные колебания 46
- Газ идеальный 69
Градус 80
- Давление идеального газа 69, 73
— парциальное 86
Дальтон Д. 86
Движение 4
— криволинейное 7
— прямолинейное равномерное 5
— — равноускоренное 6
Деформация остаточная 128
— пластическая 128
— упругая 127
Динамика 12
- Диод полупроводниковый 295
Диэлектрик (изолятор) 207
— поляризация 207
«Дырка» 285
- Закон Авогадро 85
— Ампера 243
— всемирного тяготения 18
— Гука 20, 127
— Дальтона 86
— Джоуля-Ленца 222
— Кулона 170
— Ньютона
 — первый 13
 — второй 15
 — третий 17
— Ома 215
— сохранения импульса 27
— полной механической энергии 32
— теплового равновесия 77, 78
— Фарадея (для электролиза) 300
Заряд электрический
— электрона 301
— элементарный 301
- Изотерма 85
Импульс тела 27
Индукция магнитного поля 245
Ионизация газа 303
Иоффе А. Ф. 293
Испарение 92
Источник тока 212
- Капиллярные явления 115
Карно С. 158
— цикл 155, 158
Кельвин 81
Кинематика 4
Кипение 100

- Колебания механические 36
- Количество вещества 64
 - теплоты 142
- Конденсатор 188, 202
- Конденсация 93
- Коэффициент полезного действия 157
 - сопротивления
 - температурный 272
- Кристаллизация 123
- Кулон Ш. 172
- Кулон 165

- Ленц Э. Х.* 222
- Линии магнитной индукции 248

- Масса 14
 - молекулы 60, 63
 - молекулярная относительная 63
 - молярная 65
- Менделеев Д. И.* 83
- Мениск 115
- Модуль упругости (модуль Юнга) 127
- Молекула 58
 - движение 59
 - взаимодействие 67
 - концентрация 61
 - масса 60
 - размеры 66
 - скорость 72
- Моль 71
- Монокристалл 121
- Мощность тока 222

- Нагреватель 156
- Намагничивание 256, 266
- Напряжение механическое 127
 - электрическое 195
- Напряженность 176

- Пар насыщенный 94
- Паскаль 70
- Перрен Ж.* 60
- Плавление 123
- Плазма 307
- Поверхностное натяжение 107
- Поле магнитное 244
 - — однородное 250
 - электрическое 175
- Поликристалл 122
- Полупроводник 281
 - *n*-типа 286
 - *p*-типа 286
 - *p—n*-переход 287
- Постоянная Авогадро 65
 - Больцмана 80
 - магнитная 266
 - молярная газовая 83
 - электрическая 172
- Потенциал 197
- Поток вектора напряженности (поток силовых линий) 182
 - магнитный 250
- Правила Кирхгофа 230
- Правило буравчика 246
 - левой руки 253
- Предел упругости 127
- Принцип суперпозиции 178
- Проводимость дырочная 285
 - примесная 285
 - собственная 285
 - электронная 272
- Проводник 272
- Проекция вектора на координатную ось 5
 - перемещения 5
 - скорости 5
 - ускорения 6
- Проницаемость диэлектрическая 209
 - магнитная 266
- Процесс адиабатный 141
 - изобарный 85
 - изотермический 85
 - изохорный 84
 - необратимый 150
- Прочность 130
- Психрометр 99

- Работа
 - механическая 30
 - тока 222
- Равновесие твердых тел 25
 - тепловое 77
- Разряд дуговой 306
 - искровой 305
 - несамостоятельный 303
 - самостоятельный 303
 - тлеющий 307

- Рекомбинация 305
- Решетка кристаллическая 120
- Сверхпроводимость 278
- Свободные колебания 45
- Сила 12
 - Ампера 252
 - всемирного тяготения 19
 - Лоренца 259
 - поверхностного натяжения 107
 - тока 211
 - трения 20
 - тяжести 19
 - упругости 20
- Силовые линии 179
 - густота 182
- Силы магнитные 252
 - сторонние 215
- Скорость средняя квадратическая (тепловая) 89
- Соленоид 255
- Сопротивление внутреннее 215
 - дополнительное 229
- Тело аморфное 121
 - кристаллическое 120
 - рабочее 155
- Температура 76
 - абсолютная 80
 - кипения 100
 - Кюри 269
 - критическая 103
- Термометр 77
- Теорема Гаусса 187
- Теплоемкость 146
 - молярная 147
 - при постоянном давлении 148
 - — объеме 147
 - удельная 146
- Теплота испарения удельная 93
 - конденсации 94
 - кристаллизации удельная 123
- Термодинамика
 - первый закон (первое нача-
ло) 143
 - второй закон 157
- Тесла Н. 245
- Тесла 245
- Точка росы 97
- Триод полупроводниковый (транзи-
стор) 290
- Трубка электронно-лучевая 297
- Уравнение состояния идеального
газа 82
 - Менделеева — Клапейрона 82
 - основное кинетической теории
газов 73
- Фарад 203
- Фарадей М. 298
- Ферромагнетик 268
- Холодильник 156
- Шунт 229
- Эйнштейн А. 60
- Электрическая емкость 202
- Электрический ток 211
- Электродинамика 164
- Электродвижущая сила 213
- Электролиз 298
- Электромагнит 256
- Электрометр 197
- Электрон 276
- Электроскоп 184
- Электростатика 168
- Электрический эквивалент 301
- Элемент тока 242
- Эмиссия термоэлектронная 293
- Энергия
 - кинетическая 30
 - потенциальная 31
 - заряженного конденсатора 204
 - средняя кинетическая молекулы
газа 76
 - поверхностная 104
 - внутренняя 136



МЕХАНИКА

Глава 1. Кинематика	4
§ 1. Поступательное движение тела. Материальная точка	4
§ 2. Перемещение	5
§ 3. Прямолинейное равномерное движение. Скорость	5
§ 4. Прямолинейное неравномерное движение. Ускорение	6
§ 5. Криволинейное движение	7
§ 6. Относительные и инвариантные величины в кинематике	8
Глава 2. Динамика	12
§ 7. Почему изменяется скорость тела? Силы	12
§ 8. Роль системы отсчета. Первый закон Ньютона. Инерциальные и неинерциальные системы отсчета	13
§ 9. Ускорение тел при их взаимодействии. Масса	14
§ 10. Сила и ускорение. Второй закон Ньютона	15
Глава 3. Силы и взаимодействия в природе	18
§ 11. Гравитационное взаимодействие	18
§ 12. Электромагнитное взаимодействие	19
Самое важное в первой, второй и третьей главах	24
Глава 4. Элементы статики. Равновесие твердых тел	25
§ 13. Равновесие тел при отсутствии вращения	25
§ 14. Равновесие тел с закрепленной осью вращения	25
Глава 5. Законы сохранения	27
§ 15. Импульс тела и импульс силы	27
§ 16. Закон сохранения импульса	27
§ 17. Работа и энергия	30
§ 18. Еще один вид энергии. Потенциальная энергия	31
§ 19. Закон сохранения полной механической энергии	32
§ 20. О работе силы трения	32
Самое важное в пятой главе	35
Глава 6. Механические колебания	36
Движение, которое повторяется	36
§ 21. Колебания тела на пружине	37
§ 22. Энергия колебательного движения	38
§ 23. Геометрическая модель колебательного движения	39
§ 24. Математический маятник	42
§ 25. Колебания и внешние силы	45
Самое важное в шестой главе	48

Глава 7. Волны	49
Колебания передаются от точки к точке	49
§ 26. Что такое волна?	50
§ 27. Два вида волн	51
§ 28. Уравнение бегущей гармонической волны	53
§ 29. Звуковые волны	54
Самое важное в седьмой главе	56
Заключение	56

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

Введение	58
 Глава 8. Основные сведения о молекулах	58
Гипотеза, подтвержденная опытом	58
§ 30. Движение молекул	59
§ 31. Масса молекул	60
§ 32. Число молекул — количество вещества	64
§ 33. Размеры молекул	66
§ 34. Взаимодействие молекул. Твердые тела, жидкости и газы	67
Самое важное в восьмой главе	70
 Глава 9. Кинетическая теория идеального газа	71
От гипотезы к теории	71
§ 35. Сколько молекул газа попадает на площадку?	72
§ 36. Давление идеального газа. Основное уравнение кинетической теории идеального газа	73
§ 37. Температура	76
§ 38. Градус и джоуль	80
§ 39. Уравнение состояния идеального газа	82
§ 40. Скорость теплового движения молекул	89
Самое важное в девятой главе	91
 Глава 10. Свойства паров	92
Жидкость и пар	92
§ 41. Испарение жидкости и конденсация пара	92
§ 42. Насыщенный пар и его свойства	94
§ 43. Влажность атмосферного воздуха	98
§ 44. Кипение жидкости	100
Самое важное в десятой главе	102
 Глава 11. Свойства жидкостей	103
Газ и жидкость	103
§ 45. Поверхностная энергия	104
§ 46. Поверхностное натяжение	107
§ 47. Собственная форма жидкости	110
§ 48. Явления смачивания и несмачивания	112
§ 49. Капиллярные явления	115
Самое важное в одиннадцатой главе	117

Глава 12. Свойства твердых тел	118
Жидкость становится твердым телом	118
§ 50. Образование твердого тела. Понятие о кристаллической структуре	118
§ 51. Кристаллы и их свойства. Аморфные тела	121
§ 52. Кристаллизация и плавление	123
§ 53. Упругая деформация твердых тел	126
§ 54. Пластическая деформация твердых тел	128
§ 55. Как создаются нужные технике материалы	130
§ 56. Жидкие кристаллы	132
Самое важное в двенадцатой главе	135

Глава 13. Основы термодинамики	136
Основная задача термодинамики	136
§ 57. Внутренняя энергия и ее использование для совершения работы	136
§ 58. Как найти работу при изменении объема газа	138
§ 59. В каких случаях работа, совершенная газом, равна полному изменению его внутренней энергии	140
§ 60. Первое начало термодинамики	143
§ 61. Теплоемкость вещества	146
§ 62. Необратимость процессов в природе	150
§ 63. Почему процессы в природе необратимы?	151
§ 64. Циклические тепловые двигатели	155
§ 65. Коэффициент полезного действия тепловой машины	157
§ 66. Холодильные машины	160
§ 67. Роль тепловых двигателей в развитии энергетики и транспорта	162
Самое важное в тринадцатой главе	162

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ

Введение	164
----------	-----

Глава 14. Электрические заряды и их взаимодействие	165
Масса и заряд: сходство и различие	165
§ 68. Электрический ток и электрические заряды	165
§ 69. Взаимодействие электрических зарядов	168
§ 70. Перенос заряда. Проводники и диэлектрики	169
§ 71. Закон электростатического взаимодействия (закон Кулона)	170
Самое важное в четырнадцатой главе	175

Глава 15. Электрическое поле	175
Материя — это не только вещество	176
§ 72. Электростатическое поле	179
§ 73. Силовые линии электростатического поля	184
§ 74. Проводник в электростатическом поле	187
§ 75. Напряженность поля точечных зарядов. Заряженная плоскость. Плоский конденсатор	190
§ 76. Распределение зарядов на поверхности проводника	191
Самое важное в пятнадцатой главе	333

Глава 16. Энергия заряженного тела в электростатическом поле . . .	192
Из одинаковых законов — одинаковые следствия	192
§ 77. Работа при перемещении заряда в электростатическом поле . .	193
§ 78. Напряжение между точками проводника. Измерение электрического напряжения	196
§ 79. Потенциальная энергия электрического заряда в электростатическом поле. Потенциал точки поля	197
§ 80. Электрическая емкость. Конденсатор	202
§ 81. Энергия электрического поля	204
Самое важное в шестнадцатой главе	206
Глава 17. Электростатическое поле в диэлектрике	207
Диэлектрик влияет на электростатическое поле	207
§ 82. Поляризация диэлектрика	207
§ 83. Взаимодействие зарядов в диэлектрике	209
Самое важное в семнадцатой главе	211
Глава 18. Постоянный электрический ток	211
Электрические заряды в движении	211
§ 84. Условия существования постоянного тока. Источник тока . . .	212
§ 85. Электродвижущая сила источника	213
§ 86. Закон Ома для полной цепи	215
§ 87. Электрические цепи	219
§ 88. Работа и мощность тока	222
§ 89. Измерение силы тока и напряжения	227
§ 90. Правила Кирхгофа	230
§ 91. Соединение источников тока в батарее	236
Самое важное в восемнадцатой главе	238
Глава 19. Магнитное поле электрического тока	240
Если электрические заряды движутся	240
§ 92. Взаимодействие токов в вакууме	240
§ 93. Магнитное поле электрического тока	244
§ 94. Графическое изображение магнитного поля	247
§ 95. Силы, действующие на электрический ток в магнитном поле	251
§ 96. Магниты	255
§ 97. Практические применения свойств замкнутого проводника с током в магнитном поле	257
§ 98. Движение заряженной частицы в магнитном поле. Сила Лоренца	259
§ 99. Возникновение электродвижущей силы при движении проводника в магнитном поле	261
Самое важное в девятнадцатой главе	264
Глава 20. Магнитное поле в веществе	266
Магнитное поле влияет на вещество, а вещество — на магнитное поле	266
§ 100. Намагничивание тел	266
§ 101. Ферромагнитные вещества	267
§ 102. Применение ферромагнетиков	270
Самое важное в двадцатой главе	271

Глава 21. Электрический ток в различных средах	272
Проводниками тока могут быть различные среды	272
§ 103. Элементы электронной теории проводимости металлов	272
§ 104. Экспериментальное подтверждение электронной проводимости металлов	274
§ 105. Особенности электрического тока в металлах	276
§ 106. Сверхпроводимость	278
§ 107. Электрические свойства полупроводников	281
§ 108. Природа электрического тока в полупроводниках	283
§ 109. Примесная проводимость полупроводников	285
§ 110. Односторонняя проводимость контактного слоя	287
§ 111. Полупроводниковый триод — транзистор	290
§ 112. Природа электрического тока в вакууме. Термоэлектронная эмиссия	293
§ 113. Электронно-лучевая трубка	297
§ 114. Природа электрического тока в растворах электролитов. Закон Фарадея	298
§ 115. Природа электрического тока в газах	301
§ 116. Самостоятельный разряд	303
§ 117. Различные виды разряда в газах	305
§ 118. Плазма	307
Самое важное в двадцать первой главе	309
Лабораторные работы	311
Ответы к упражнениям	326
Предметно-именной указатель	328

Учебное издание

Кикоин Абрам Константинович
Кикоин Исаак Константинович
Шамаш Сергей Яковлевич
Эвенчик Эсфирь Ефимовна

ФИЗИКА

Учебник для 10 класса

Зав. редакцией *В. И. Егудин*
Редактор *В. В. Жумаев*
Художественный редактор *Т. В. Морозова*
Художник *И. О. Кабардин*
Технические редакторы *Н. В. Лукина, С. В. Щербакова*
Корректоры *В. М. Гончар, М. А. Тереньтьева*

Налоговая льгота — Общероссийский классификатор продукции ОК 005-93—953000.
Изд. лиц. Серия ИД № 05824 от 12.09.01. Подписано в печать с оригинал-макета 20.10.05.
Формат 70×90^{1/16}. Бумага писчая. Гарнитура Школьная. Печать офсетная. Усл.
печ. л. 24,57+0,36 форз. Усл. кр.-отт. 50,97. Уч.-изд. л. 25,9+0,67 форз. Тираж 10 000 экз.
Заказ № 2976.

Федеральное государственное унитарное предприятие ордена Трудового Красного Знамени
«Издательство «Просвещение» Федерального агентства по печати и массовым коммуника-
циям. 127521, Москва, 3-й проезд Марьиной рощи, 41.

Отпечатано в ОАО «Тверской ордена Трудового Красного Знамени полиграфкомбинат детской
литературы им. 50-летия СССР». 170040, г. Тверь, проспект 50 лет Октября, 46.

