

Д. М. Казахбаева, Б. А. Кронгарт,
У. К. Токбергенова

ФИЗИКА

10

Учебник для 10 классов
общественно-гуманитарного
направления
общеобразовательных школ

*Утверждено Министерством образования
и науки Республики Казахстан*



Алматы "Мектеп" 2019

УДК 373.167.1
ББК 22.3я72
К14

Казахбаева Д. М. и др.
К14 **Физика.** Учебник для 10 кл. обществ.-гуманит. направления общеобразоват. шк. / Д. М. Казахбаева, Б. А. Кронгарт, У. К. Токбергенова. — Алматы: Мектеп, 2019. — 216 с.: ил.

ISBN 978—601—07—1115—0

К $\frac{4306021200—049}{404(05)—18}$ 50(1)—19

УДК 373.167.1
ББК 22.3я72

© Казахбаева Д. М., Кронгарт Б. А.,
Токбергенова У. К., 2019

© Издательство "Мектеп",
художественное оформление, 2019

Все права защищены

Имущественные права на издание
принадлежат издательству "Мектеп"

ISBN 978—601—07—1115—0

**Раздел
I**

МЕХАНИКА

- Глава 1. Кинематика
- Глава 2. Динамика
- Глава 3. Статика и гидростатика
- Глава 4. Законы сохранения
- Глава 5. Гидродинамика



**Раздел
II**

ТЕПЛОВАЯ ФИЗИКА

- Глава 6. Молекулярная физика
- Глава 7. Газовые законы
- Глава 8. Основы термодинамики
- Глава 9. Жидкости и твердые тела

**Раздел
III**

**ЭЛЕКТРИЧЕСТВО
И МАГНЕТИЗМ**

- Глава 10. Электростатика
- Глава 11. Постоянный ток
- Глава 12. Электрический ток в различных средах
- Глава 13. Магнитное поле
- Глава 14. Электромагнитная индукция



ПРЕДИСЛОВИЕ

Знание — это то, что уравнивает народ с народом, человека с человеком.

Мухтар Ауэзов

Дорогие учащиеся! На основном уровне школьного образования вы ознакомились с логически завершенным содержанием курса физики, предусматривающим обеспечение системой фундаментальных знаний по основам физической науки. Эти знания будут основой для дальнейшего изучения физики в 10 классе.

Учебник для 10 классов общественно-гуманитарного направления обучения способствует формированию и развитию способностей наблюдать, экспериментировать, объяснять, исследовать, анализировать, решать количественные и качественные задачи.

В физике большую роль играют наблюдение и эксперимент, без них невозможно освоить данный предмет. Поэтому, изучая материал каждого параграфа, выполняйте предложенные вам наблюдения и лабораторные работы, домашние эксперименты. Только тогда можно хорошо освоить учебный материал. С этой целью в учебнике предлагается выполнение практико-ориентированных заданий, лабораторных и практических работ, а также решение задач. Для лучшего освоения материала целесообразно своевременно выполнять эти задания.

Содержание учебника физики для 10 классов общественно-гуманитарного направления состоит из трех разделов, в которые включены 14 глав. В конце учебника представлен физический практикум.

Каждая глава учебника содержит примеры решения задач, которые позволят вам приобрести навыки их самостоятельного решения. Задачи в параграфах подобраны таким образом, что вы можете самостоятельно выстроить для себя индивидуальную образовательную траекторию.

В начале каждого параграфа учебника даются ключевые слова, которые знакомят вас с терминологией, используемой в материале параграфа, что способствует развитию языковых навыков. Там же указаны цели, которых вы должны достичь, изучив материал соответствующего параграфа. В конце параграфа размещены вопросы для самоконтроля, вопросы для рефлексии с целью выяснения уровня, на котором вы освоили тему, что осталось непонятным, и, что еще предстоит сделать для устранения выявленных пробелов.

В учебнике материал, отмеченный вертикальной линией, не является обязательным. Он предназначен для учащихся, желающих изучить предмет более глубоко. Наиболее сложные вопросы и задания отмечены звездочкой.

Изучение курса “Физика” дает возможность понимать многие явления в природе. Поэтому старайтесь обращать внимание на применение научных открытий в быту, на строение и принципы работы машин, устройств, аппаратов, а также на последствия производственных действий на окружающую среду. Знания по физике будут востребованы в жизни, поэтому старайтесь более серьезно и вдумчиво относиться к учебе и вовремя восполнять возможные пробелы в знаниях.

Желаем вам успехов в учебе!

Авторы



§ 1. Основные понятия и уравнения кинематики равноускоренного движения тела

Ключевые понятия: материальная точка, траектория, путь, перемещение, система отсчета, скорость, ускорение, равномерное и равноускоренное движение.

На этом уроке вы:

повторите равномерное и изучите равнопеременное движения.

Кинематика (кинематика — от лат. *kinematics* — “движение”) изучает механическое движение тел, не рассматривая причины, которыми это движение вызывается.

Механическим движением называют изменение положения тела (материальной точки) в пространстве относительно других тел с течением времени.

Для описания движения тела необходимо знать его положение в пространстве в любой момент времени. К кинематическим характеристикам движения относятся траектория, путь, перемещение, скорость, ускорение и т. д. Положение тела при его движении можно указать, если мы рассматриваем его как материальную точку.

Материальной точкой называют тело, размерами которого можно пренебречь в условиях рассматриваемой задачи.

Тело можно принимать за материальную точку, когда пройденный путь намного больше собственных размеров тела. Одним из важных понятий при описании движения тела является траектория.

Линию, вдоль которой происходит движение тела, называют траекторией (рис. 1.1). Траектория зависит от выбора систем отсчета.

Путь — это расстояние, пройденное телом вдоль траектории. Обозначают путь буквой l . Путь, как и всякая длина, есть величина скалярная. Он показывает, как далеко переместилось тело по своей траектории, но ничего не говорит о том, в какую сторону оно переместилось и где в данный момент находится. Для определения положения движущегося тела в заданный момент времени надо знать не пройденный им путь, а его перемещение.

Перемещение. *Направленный отрезок прямой, проведенный из начального положения тела в его последующее положение, называется перемещением* (рис. 1.2).



Рис. 1.1

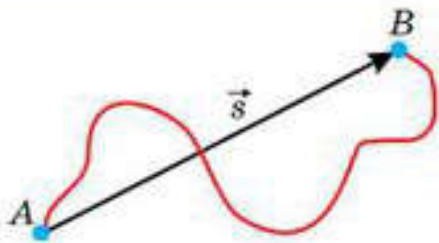


Рис. 1.2

Оно обозначается через \vec{s} , длина вектора перемещения называется его *модулем*. Путь и модуль перемещения могут совпадать или не совпадать друг с другом. Они будут равны в том случае, если тело движется прямолинейно в одном направлении. В случае, показанном на рисунке 1.3, путь, который придется пройти

путнику от вершины одного холма до вершины другого холма, значительно длиннее, чем путь по прямой, который преодолевает птица, значит $l_1 = |\vec{s}| < l_2$.

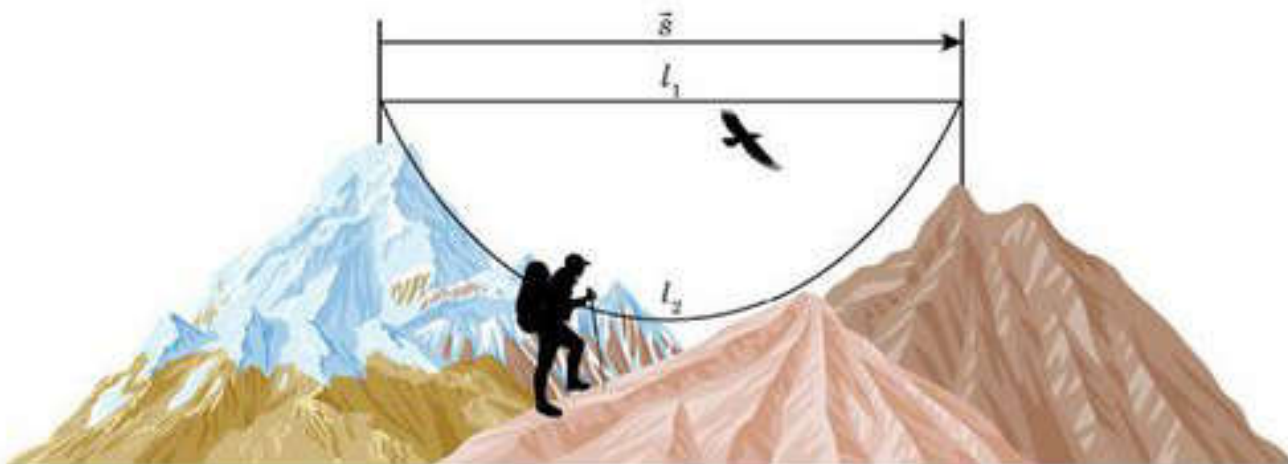


Рис. 1.3

Положение материальной точки в пространстве в заданный момент времени можно определить, если ввести систему отсчета.

Тело отсчета, связанная с ним система координат и прибор для измерения времени образуют систему отсчета.

Любое движение рассматривается относительно выбранной системы отсчета. Выберем произвольное начало отсчета и координатные оси Ox , Oy , Oz (рис. 1.4). При этом координаты движущейся точки являются функциями времени: $x = x(t)$, $y = y(t)$, $z = z(t)$. Эти зависимости

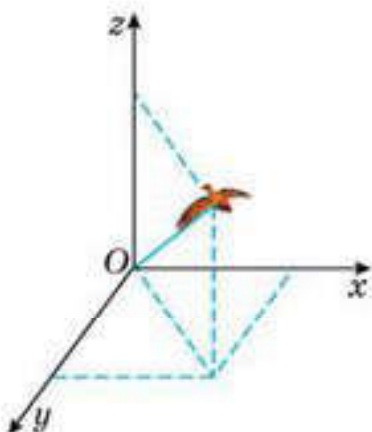


Рис. 1.4

координат от времени называются *уравнениями движения*. Если знать их конкретный вид для определенного движения, то, подставляя в них любые интересующие нас моменты времени, мы можем найти положение движущегося тела, т.е. его координаты Ox , Oy , Oz (на рисунке 1.4 — птицы).

В ряде случаев положение материальной точки в пространстве характеризуют не координатами, а радиус-вектором \vec{r} . Отметим, что *радиус-вектором \vec{r} называется направленный отрезок*

прямой, проведенный из начала отсчета в выбранную точку (рис. 1.5). Так, например, радиолокатор, обнаруживая самолет, может определить его положение, т. е. угол α между направлением на самолет и выбранным направлением Ox , и расстояние до него (рис. 1.6). Таким образом, во всех подобных случаях для определения положения объекта (предмета) необходимо знать величину, которая одновременно указывает направление, в котором находится объект, и расстояние от точки (начала отсчета) до него. Такой величиной и является радиус-вектор.

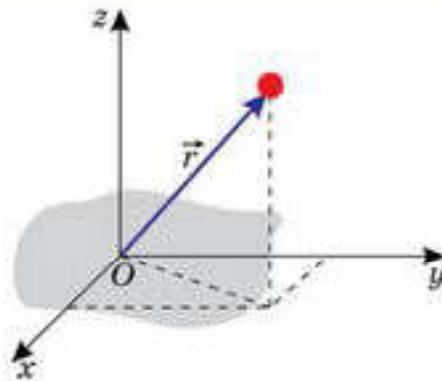


Рис. 1.5

Закон движения в векторной форме — зависимость радиус-вектора от времени $\vec{r}(t)$.

Рассмотрим связь радиус-вектора и координат тела на плоскости в произвольный момент времени (рис. 1.7). Пусть $\vec{OA} = \vec{r}_1$ — радиус-вектор начальной точки, $\vec{OA}' = \vec{r}_2$ — радиус-вектор конечной точки движения. Из рисунка видно, что перемещение AA' равно разности двух векторов \vec{r}_1 и \vec{r}_2 : $\vec{AA}' = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$. В процессе движения точки ее радиус-вектор за время Δt изменяется по модулю и направлению. Это позволяет нам рассматривать перемещение как изменение радиус-вектора $\Delta \vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$, возникшее в результате движения материальной точки. Тогда перемещение можно определить иначе, чем это было сделано раньше: *перемещением движущейся точки называют изменение ее радиус-вектора.*

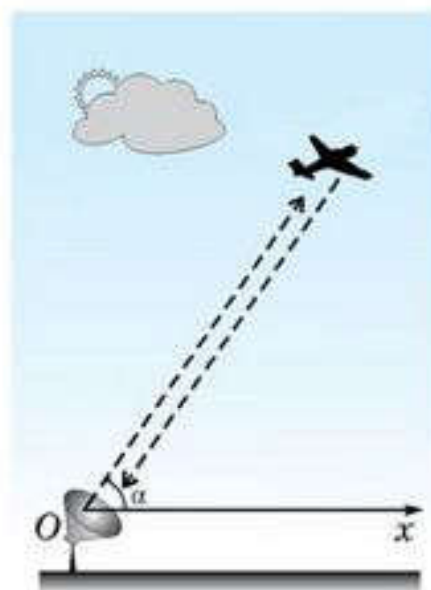


Рис. 1.6

Проекция радиус-вектора на координатную ось равна координате тела на этой оси: $r_x = x$, $r_y = y$.

В зависимости от характера изменения скорости тела механическое движение может быть *равномерным* или *неравномерным*.

Равномерным называют движение, при котором тело за любые равные промежутки времени совершает одинаковые перемещения. При равномерном прямолинейном движении $\vec{v} = \text{const}$.

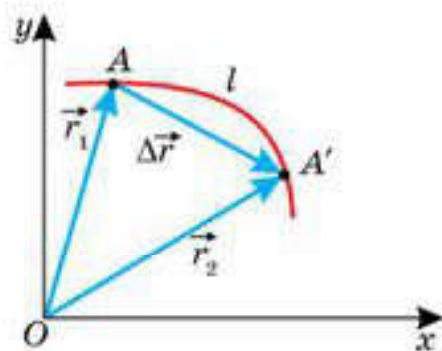


Рис. 1.7

Если же тело за равные промежутки времени совершает разные перемещения, то движение является *неравномерным*. Для характеристики движения тела вводится понятие *скорости*.

Скорость равномерного прямолинейного движения. Скорость равномерного прямолинейного движения — векторная величина, равная отношению перемещения \vec{s} ко времени t , в течение которого оно произошло: $\vec{v} = \frac{\vec{s}}{t}$.

Средняя скорость. Если тело за время Δt , двигаясь неравномерно, совершает перемещение Δs , то его средняя скорость определяется так:

$$\vec{v}_{\text{ср}} = \frac{\Delta \vec{s}}{\Delta t}.$$

Отметим, что для определения модуля средней скорости этой формулой пользуются только в случае, когда тело движется вдоль прямой в одну сторону (рис. 1.8).

В обыденной жизни для нахождения скорости используют знакомое всем выражение: $v_{\text{ср}} = \frac{l}{t}$; где $v_{\text{ср}}$ — средняя путевая скорость (или просто средняя скорость), l — пройденное расстояние; t — полное время движения. Например, если вы рассчитываете примерно за 4 ч преодолеть расстояние 320 км на автомобиле, то его средняя путевая скорость должна составлять, по меньшей мере, 80 км/ч.

Мгновенная скорость. Вы уже знаете, что если тело движется неравномерно, то в каждой точке траектории значения его скорости разные. Скорость тела в данной точке траектории или в данный момент времени называют *мгновенной скоростью*.

Мгновенная скорость — векторная физическая величина, равная отношению малого перемещения $\Delta \vec{s}$ к малому промежутку времени Δt , за которое это перемещение произошло:

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

где *lim* — от лат. *limitis* — “граница”, “предел”, что означает математическую операцию перехода к пределу.

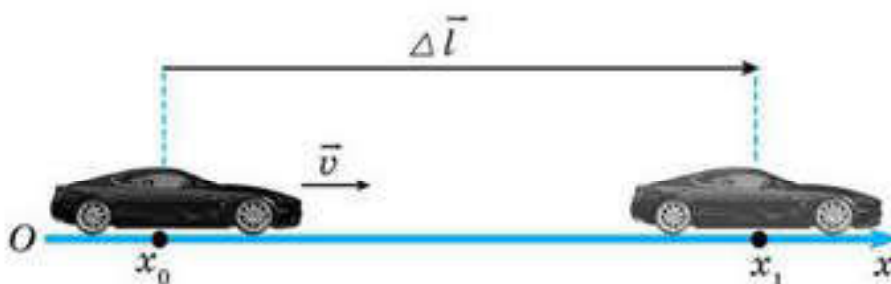


Рис. 1.8

В практических целях удобнее определять модуль мгновенной скорости. Так, например, автомобиль проезжает по шоссе 20 км ровно за 15 мин (со средней скоростью 80 км/ч). Во время езды стрелка спидометра будет отклоняться от цифры 80, показывая скорость движения в данный момент времени, т. е. мгновенную скорость. Чем меньше интервал времени, тем точнее мы можем определить скорость движения на небольшом участке пути. Если тело за промежуток времени проходит путь Δl , то модуль мгновенной скорости определяется следующим выражением:

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta l}{\Delta t}.$$

Ускорение. Известно, что скорость тела в одном случае может быстро возрастать, а в другом — уменьшаться, или оставаться постоянной. Для характеристики этого изменения скорости вводится физическая величина — ускорение. Итак, **ускорение** — векторная физическая величина, равная отношению изменения скорости $\Delta \vec{v}$ ко времени Δt , за которое произошло это изменение:

$$\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}. \quad (1.2)$$

По этой формуле можно рассчитать среднее ускорение.

Мгновенное ускорение. Поскольку ускорение меняется во времени, то нужно уметь определять изменение скорости $\Delta \vec{v}$ за небольшой интервал времени Δt . Как показывают опыты, отношение $\Delta \vec{v}$ к Δt стремится к постоянной величине при уменьшении Δt . Эта величина называется **мгновенным ускорением**:

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

Для выявления нарушения скорости движения автомобилей используются переносные доплеровские радарные приборы, измеряющие скорость. Прибор излучает радиосигнал известной частоты и регистрирует отраженный сигнал. По изменению частоты прибор вычисляет разность между частотами исходного и отраженного сигнала, и на основе этого определяется мгновенная скорость движения автомобиля.

Мгновенное ускорение — векторная физическая величина, равная пределу отношения изменения скорости к промежутку времени, в течение которого это изменение произошло.

Рассмотрим движение велосипедиста на прямолинейном участке пути. Скорость движения велосипедиста в некоторый момент времени больше начальной скорости (рис. 1.9, а). В этом случае вектор ускорения направлен в ту же сторону, что и разность векторов $\Delta \vec{v} = \vec{v}_1 - \vec{v}_0$, при торможении велосипедиста на прямолинейном участке пути конечная скорость $\Delta \vec{v}_4$ меньше скорости $\Delta \vec{v}_3$, поэтому вектор ускорения \vec{a} так же, как и вектор $\Delta \vec{v} = \vec{v}_4 - \vec{v}_3$, направлен против направления движения

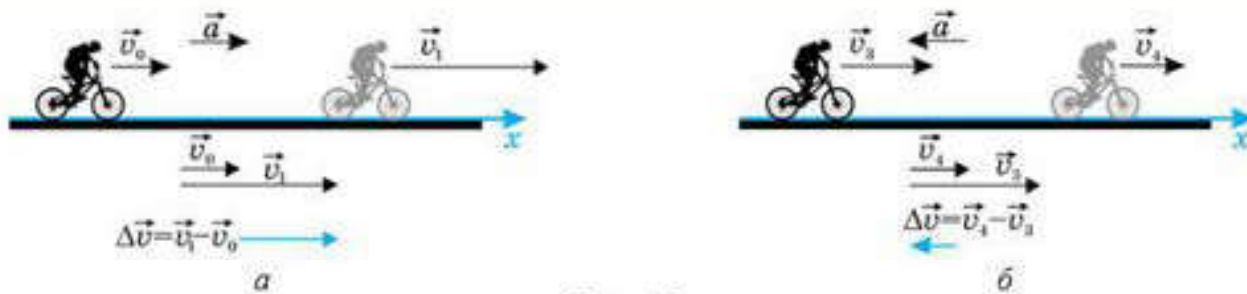


Рис. 1.9

велосипедиста (рис. 1.9, б). Таким образом, мы выяснили, что *ускорение характеризует быстроту изменения скорости.*

Рассмотрим движение с постоянным ускорением. Движение с постоянным ускорением может быть *равноускоренным*, *равнозамедленным* или последовательной совокупностью этих движений — *равнопеременным*. Но следует помнить, что равнозамедленное (равнопеременное) движение является частным случаем равноускоренного движения.

Равноускоренным называют движение, при котором скорость тела за любые равные промежутки времени увеличивается на одну и ту же величину.

Теория равноускоренного движения была разработана Галилео Галилеем.

В СИ единица ускорения — метр на секунду в квадрате (м/с^2).

С помощью формулы (1.2) запишем выражение для расчета скорости тела через время t после начала движения:

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t, \tag{1.4}$$

Формула скорости для проекций вдоль оси Ox при прямолинейном движении тела будет иметь следующий вид:

$$v_{0x} = v_{0x} + a_x t. \tag{1.5}$$

Формула для расчета перемещения при равноускоренном движении имеет вид:

$$\vec{s} = \vec{v}_0 t + \frac{\vec{a}t^2}{2}, \tag{1.6}$$

где \vec{v}_0 — начальная скорость тела, \vec{a} — ускорение тела, тогда проекция вектора перемещения \vec{s} на ось Ox (рис. 1.10) имеет следующий

вид: $s_x = v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}$.

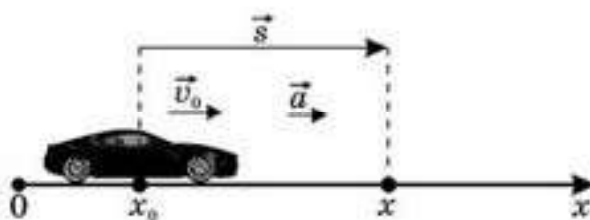


Рис. 1.10

Учитывая, что $s_x = x - x_0$, проекцию перемещения s_x запишем через разность координат:

$$x - x_0 = v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2} \text{ или } x = x_0 + v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}. \quad (1.7)$$

Полученное выражение (1.7) называется **уравнением равноускоренного движения** тела и по этому уравнению можно определить координату тела в любой момент времени после начала движения.

Аналогичным образом можно получить выражение и для координаты Oy :

$$y = y_0 + v_{0y}t + \frac{a_y t^2}{2}.$$

В случае, когда движение тела происходит без начальной скорости и начальная координата равна нулю, то

$$x = \frac{a_x t^2}{2} \text{ или } y = \frac{a_y t^2}{2}. \quad (1.8)$$

Для вычисления координаты тела при равноускоренном движении можно пользоваться уравнением, в которое время не входит. Так, например, подставляя в уравнение $x = \frac{a_x t^2}{2}$ значение времени из выражения (1.5), получим $x = \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{2a}$, а когда $v_{0x} = 0$, то $x = \frac{v_x^2}{2a_x}$, откуда $v_x = \sqrt{2a_x x}$. Учитывая, что $a_y = g$, $y = h$, аналогично можно получить выражение для координаты Oy : $v_y = \sqrt{2gh}$.

Каждый знает, что опасно прыгать на землю даже с крыши невысокого дома. А если эта высота составляет 10 м? Простые расчеты по формуле $v = \sqrt{2gh}$ показывают, что скорость свободного падения достигнет при этом значения $v = \sqrt{2 \cdot 9,8 \text{ м/с}^2 \cdot 10 \text{ м}} = 14 \text{ м/с} = 50 \text{ км/ч}$.

Это — самая большая скорость движения автомобиля по городу (сопротивление воздуха немного эту скорость уменьшает).

Наглядную картину того, как изменяется скорость тела при равномерном прямолинейном движении, можно получить, построив график скорости $v_x(t)$. График $v_x(t)$ представляет собой прямую, параллельную оси времени (рис. 1.11). С помощью графика скорости можно определить значение проекции перемещения, совершенного телом за время t .

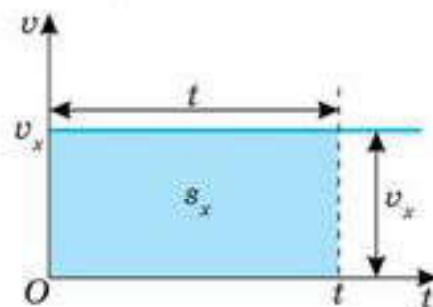


Рис. 1.11

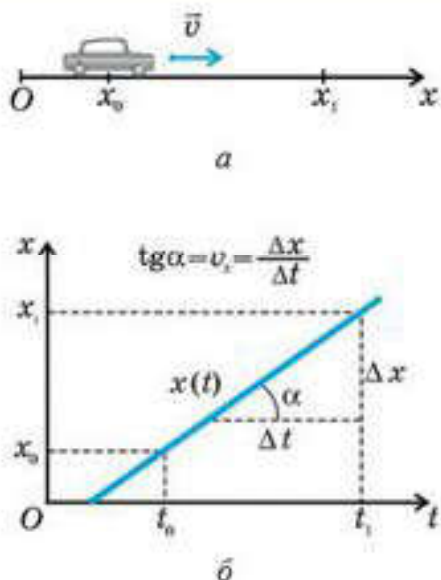


Рис. 1.12

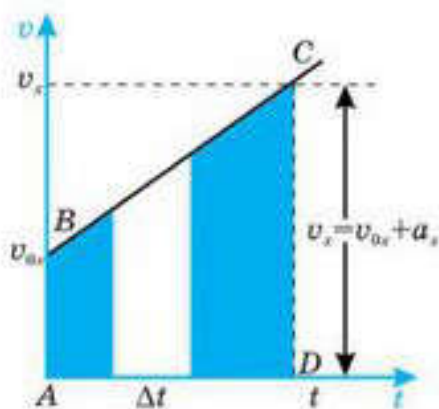


Рис. 1.13

На рисунке 1.13 приведен график зависимости $v_x(t)$, для случая, когда значения проекций начальной скорости и ускорения — положительны. По аналогии со случаем равномерного прямолинейного движения можем считать, что проекция перемещения, совершенного телом за время Δt , будет равна площади трапеции $ABCD$, под графиком зависимости скорости от времени. Площадь трапеции равна произведению полусуммы оснований на ее высоту, в нашем случае, основания v_{0x} и $v_{0x} + a_x t$, высота — t , тогда

$$s_x = \frac{1}{2}(v_{0x} + v_{0x} + a_x t)t, \quad (1.10)$$

или, учитывая, что $s_x = x - x_0$, получим формулу для расчета координаты тела при равноускоренном прямолинейном движении:

$$x = x_{0x} + v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}. \quad (1.11)$$

Площадь прямоугольника под графиком $v_x(t)$ равна проекции перемещения автомобиля за соответствующее время.

На рисунке 1.12, б показан график зависимости положения тела от времени при движении с постоянной скоростью. Если автомобиль в начальный момент времени t_0 находился в точке x_0 , а в момент времени t_1 — в точке с координатой x_1 , (рис. 1.12, а), то $x_1 - x_0 = v_x(t_1 - t_0)$, или

$$v_x = \frac{x_1 - x_0}{t_1 - t_0} = \frac{\Delta x}{\Delta t}. \quad (1.9)$$

Наклон графика $x(t)$, т. е. тангенс угла наклона α , представляет собой значение проекции скорости v_x (рис. 1.12, б). Полученное выражение для проекции скорости может быть как положительным, так и отрицательным, причем знак указывает на направление движения. Если проекция скорости отрицательна, то движение происходит против направления, выбранного на оси Ox .

Поскольку скорость постоянна и график представляет собой прямую, не имеет значения, насколько большим вы выберете треугольник: отношение $\frac{\Delta x}{\Delta t}$ будет одним и тем же.

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое *кинематика*? Какие вам известны кинематические величины? Почему можно утверждать, что скорость является векторной величиной?
2. Какие способы описания механического движения тела вы знаете?
3. Каково назначение радиус-вектора? Что с его помощью определяется?
4. При любом неравномерном движении изменяется скорость. Как ускорение характеризует это изменение?
5. На чем основано утверждение, что ускорение является вектором?
6. Означает ли большая скорость большее ускорение? Приведите примеры.
7. Как должно быть направлено ускорение тела, чтобы скорость его возрастала? Уменьшалась?
8. Как по графику зависимости $v_x(t)$ определяется проекция перемещения тела на ось Ox при равномерном прямолинейном движении?
9. Зависит ли угол наклона графика зависимости $x(t)$ при равномерном прямолинейном движении от скорости?
- *10. Как определяется графически перемещение тела при равноускоренном движении?

Что освоили по этой теме?

Насколько полезна и интересна была для вас полученная информация?	Что еще вы хотели бы узнать по данной теме?	Какие вопросы возникли у вас в ходе изучения темы?

§ 2. Относительное движение

Ключевые понятия: относительность движения, тело отсчета, система отсчета, скорость.

На этом уроке вы:

узнаете о главной особенности любого движения — его относительности; научитесь решать задачи, используя формулу скорости.

Главной особенностью любого движения является его *относительность*. Так, например, для наблюдателя, находящегося в движущемся поезде, пассажиры, сидящие в вагоне, и сам вагон неподвижны, а деревья и здания движутся; а для наблюдателя, стоящего на перроне, неподвижны здания и деревья, зато вагон с пассажирами движется.

Туристы, плывущие по течению реки на плоту, считают себя неподвижными относительно плота и воды. Для наблюдателя, стоящего на берегу, все происходит наоборот. Из этих примеров следует, что движение одних и тех же тел с точки зрения разных наблюдателей выглядит по-разному. Следовательно, для описания движения любого тела сначала нам необходимо выбрать тело, относительно которого данное движение будет рассматриваться.

Вам известно, что *тело, относительно которого рассматривают движение, называется телом отсчета*.

Тело отсчета условно считается неподвижным, а изучаемые тела могут как двигаться, так и покоиться относительно него. Выбрать тело отсчета необходимо так, чтобы максимально упростить изучение движения тела. Так, например, когда человек едет на машине, то удобнее за тело отсчета взять тело, расположенное на поверхности земли, машина же будет движущимся телом.

Итак, *любое механическое движение является относительным*.

С телом отсчета обычно связывают систему координат. Рассмотрим, как можно определить координаты движущегося по озеру катера. О движении катера мы можем судить по изменению его положения относительно, например, березы, растущей на берегу. Если его положение относительно березы меняется, то это значит, что катер движется относительно березы. Но как узнать, где будет находиться катер в какой-то вполне определенный момент времени относительно все той же березы? Для ответа на этот вопрос мы воспользуемся прямоугольной системой координат, которую свяжем с выбранным нами деревом (рис. 2.1).

Оказывается, что и этого недостаточно. Изменение положения катера относительно березы необходимо фиксировать во времени. Возникает необходимость введения *системы отсчета*.

Вспомним, что *системой отсчета называется совокупность связанных между собой тела отсчета, системы координат и прибора, отсчитывающего время (часы)*.

Для удобства тело отсчета обычно помещают в точке пересечения координатных прямых, которую называют *началом отсчета* или *началом координат*.

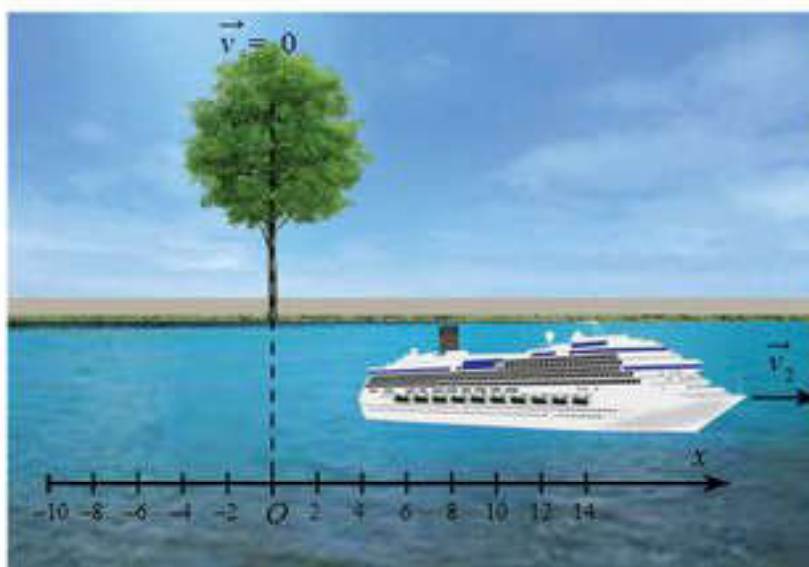
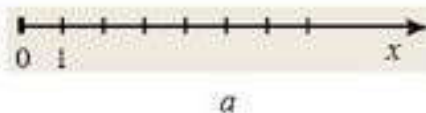


Рис. 2.1

Напоминаем, что под *координатной прямой* мы понимаем линию, имеющую направление, точку отсчета и единичный отрезок (рис. 2.2, а).



Система координат в плоскости выглядит так, как изображено на рисунке 2.2, б. Горизонтальная ось называется *осью абсцисс*, вертикальная — *осью ординат*. На рисунке 2.2, б видно, что точка *A* имеет координаты 3 и 5, что записывается так: $A(3; 5)$. Если точка *A* переместится в точку *B*, то ее координаты изменятся и на координатной плоскости она будет иметь координаты этой точки, т. е. $B(5; 2)$.

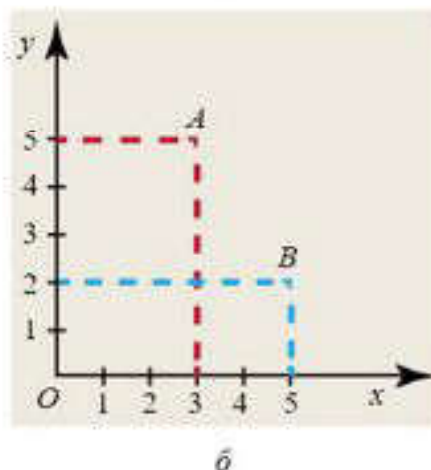


Рис. 2.2



а



б

Рис. 2.3

Форма траектории зависит от выбора системы отсчета. Например, траектория движения Луны относительно Земли представляет собой окружность, а относительно Солнца — линию более сложной формы. На рисунках 2.3, а и 2.3, б изображены виды этих траекторий.

Попробуйте представить себе траекторию движения пловца, переплывающего реку, двигаясь перпендикулярно к ее берегам: а) относительно берега; б) относительно плота, плывущего по течению реки.

Изменится ли вид траектории, если пловец, переплывающий реку, начнет уставать?

Вопросы для самоконтроля

1. Какое тело называют «телом отсчета»? Какие тела выбирают в качестве тел отсчета?
2. Что называется «системой отсчета»? Почему, говоря о механическом движении, необходимо указывать систему отсчета?
3. Движение одного и того же тела можно описывать в разных системах отсчета. Изменится ли характер движения тела при переходе из одной системы отсчета в другую?

4. Какую форму относительно земли имеют траектории движения а) детей, катающихся на карусели; б) колесо велосипеда; в) карандаш, скатывающийся со стола?
- *5. Водитель легкового автомобиля догоняет грузовую машину. Ему кажется, что грузовая машина приближается к нему. Как это объяснить?
- *6. Воздушный шар оказался в сплошном тумане. Может ли воздухоплаватель, не пользуясь приборами, определить направление полета?
7. Приведите примеры случаев, когда одно и то же тело неподвижно относительно одних тел и движется относительно других.
8. Можно ли определить местонахождение тела, зная только модуль скорости?
9. Скорость — величина векторная или скалярная? Обоснуйте свой ответ.

Что освоили по этой теме?

Насколько полезна и интересна была для вас полученная информация?	Что еще вы хотели бы узнать по данной теме?	Какие вопросы возникли у вас в ходе изучения темы?

§ 3. Кинематика криволинейного движения

Ключевые понятия: криволинейное движение, скорость и ускорение при криволинейном движении.

На этом уроке вы: установите различие между прямолинейным и криволинейным движением.



Рис. 3.1

И в природе, и в технике мы часто наблюдаем движение тел по окружности: Земля вокруг Солнца, Луна и искусственные спутники вокруг Земли — по орбитам, близким к круговым (рис. 3.1), вращающаяся карусель, электрон вокруг ядра атома и др. И любое криволинейное движение можно представить как движение по окружностям разных радиусов.

Как вам известно, если размеры тела, движущегося по окружности, много меньше радиуса окружности, то тело можно рассматривать как материальную точку.

Мгновенную скорость, с которой тело движется по окружности, называют *линейной скоростью*. Поскольку при равномерном движении по окружности путь, проходимый телом за полный оборот, равен длине окружности и каждый оборот совершается за одно и то же время, то модуль линейной скорости движения тела равен длине окружности $l = 2\pi r$, деленной на период T :

$$v = \frac{2\pi r}{T}. \quad (3.1)$$

Из курса 9 класса вам известно, что изменение угла поворота с течением времени характеризуется *угловой скоростью* и при равномерном вращении определяется формулой:

$$\omega = \frac{\varphi}{t}, \quad (3.2)$$

где φ — угол поворота.

Полный оборот точки по окружности составляет угол 2π рад. Поскольку время, за которое точка совершает один полный оборот ($t = T$), то угловую скорость можно определять и по следующему выражению:

$$\omega = \frac{\varphi}{t} = \frac{2\pi}{T} = 2\pi V. \quad (3.3)$$

А зависимость между угловой и линейной скоростями находится так:

$$\frac{v}{\omega} = \frac{2\pi r v}{2\pi v} = r.$$

Значит, $v = \omega r$ или

$$\omega = \frac{v}{r}. \quad (3.4)$$

Формулы угловой и линейной скоростей широко применяются при решении задач. При равномерном движении по окружности модуль линейной скорости v остается постоянным, но это не означает, что направление линейной скорости не изменяется. Здесь мы должны учесть различие между направлением и модулем скорости. Направление скорости при таком движении будет непрерывно изменяться.

Скорость тела в любой точке круговой траектории будет направлена по касательной к кривой в этой точке, а в каждой точке окружности вектор ускорения направлен вдоль радиуса окружности к ее центру (рис. 3.2), такое ускорение называют *центростремительным ускорением* $\vec{a}_{\text{цс}}$. По модулю оно выражается формулой:

$$a_{\text{цс}} = \frac{v^2}{r}, \quad (3.5)$$

где v — модуль линейной скорости; r — радиус окружности.

Нередко бывает удобно центростремительное ускорение характеризовать через радиус окружности r , период обращения T . Тогда формулу для центростремительного ускорения (3.5) с учетом (3.1) можем записать в виде:

$$a_{\text{цс}} = \frac{4\pi^2}{T^2} r = 4\pi^2 V^2 r,$$

где V — частота обращения, равная $V = \frac{1}{T}$.

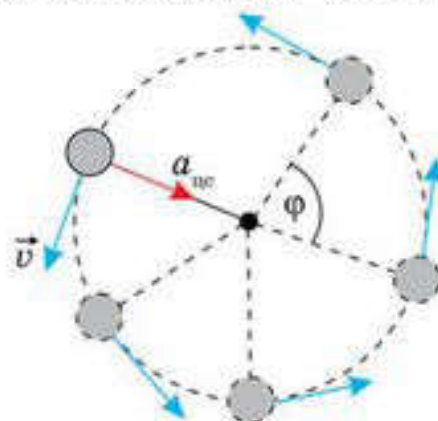


Рис. 3.2

Вопросы для самоконтроля

1. Можно ли равномерное движение по окружности считать равноускоренным движением?
2. Как направлена мгновенная скорость при криволинейном движении?
3. Может ли тело двигаться по криволинейной траектории без ускорения?
4. Какая связь между криволинейным движением и движением по окружности?
- *5. Как выражается центростремительное ускорение через частоту обращения?



Задание

1. Используя свои наблюдения за окружающим миром и дополнительную литературу, напишите эссе о роли физики в жизни современного общества.
2. Оцените, с какой скоростью вы проходите 100 м по прямой при равномерной ходьбе. Можно ли утверждать, что это перемещение? Ответ обоснуйте.

Примеры решения задач

1. Первый участок трассы длиной 120 м лыжник прошел за 2 мин, а второй, длиной 27 м, — за 1,5 мин. Найдите среднюю скорость движения лыжника на протяжении всего пути.

Д а н о:

$$s_1 = 120 \text{ м}$$

$$t_1 = 2 \text{ мин} = 120 \text{ с}$$

$$s_2 = 27 \text{ м}$$

$$t_2 = 1,5 \text{ мин} = 90 \text{ с}$$

$$v_{\text{ср}} = ?$$

Решение. Направим ось Ox в сторону движения лыжника (рис. 3.3). Средняя скорость равна $v_{\text{ср}} = \frac{s}{t}$, где $s = s_1 + s_2$ — весь пройденный путь; $t = t_1 + t_2$ — время движения лыжника. Тогда средняя скорость:

$$v_{\text{ср}} = \frac{s_1 + s_2}{t_1 + t_2}; v_{\text{ср}} = \frac{120 \text{ м} + 27 \text{ м}}{120 \text{ с} + 90 \text{ с}} = \frac{147 \text{ м}}{210 \text{ с}} = 0,7 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

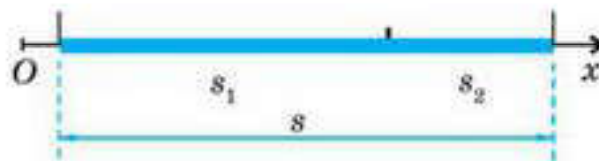


Рис. 3.3

Ответ: 0,7 м/с.

2. Один из способов оценки качества автомобиля основан на определении того, насколько быстро он разгоняется с места до скорости 60 км/ч. У некоторых автомобилей ускорение лимитируется не мощностью двигателя, а проскальзыванием колес. Хорошие шины обеспечивают ускорение примерно $0,5 g$. Сколько времени и какое расстояние потребуются в этом случае для разгона до 60 км/ч?

Д а н о:

$$v = 60 \frac{\text{км}}{\text{ч}} = 16,8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$a = \frac{1}{2} \cdot 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$$

$$v_0 = 0$$

$$t \text{ — ? } \quad x \text{ — ?}$$

Решение . Так как $v_0 = 0$, то $v = at$, откуда

$$t = \frac{v}{a}; \quad t = \frac{16,8 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{\frac{1}{2} \cdot 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}} = 3,4 \text{ с};$$

$$x = \frac{at^2}{2}; \quad x = \frac{\frac{1}{2} \cdot 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot (3,4 \text{ с})^2}{2} = 28,3 \text{ м}.$$

Ответ : 28,3 м.

Упражнение 1

1. Известны координаты начальной и конечной точек перемещения тела: $A(1; 1)$ и $A'(3; 3)$. Определите модуль и направление вектора перемещения. Нарисуйте радиус-векторы точек A и A' .
2. Направляясь в плавательный бассейн, спортсмен проходит сначала 3 км на юг, где встречается со своим другом. Затем они проходят 4 км в западном направлении, чтобы попасть в бассейн. Определите модуль перемещения спортсмена.
3. Положение некоторого автомобиля в зависимости от времени на автотрассе Алматы—Талдыкорган обозначено выражением $x = 50 + 100t$ (в километрах и часах), где x — расстояние от Алматы, а t — время движения, отсчитываемое от 9 ч утра. На каком расстоянии от Алматы находился автомобиль в 9 ч? В 11 ч?
4. Велосипедист начинает двигаться из состояния покоя с ускорением $0,2 \text{ м/с}^2$. По истечении какого времени скорость велосипедиста будет равной 1 м/с ?
5. Велосипедист движется по закруглению дороги радиусом 50 м со скоростью 36 км/ч . С каким ускорением он проходит закругление?
6. Каков радиус кривизны закругления дороги, если автомобиль движется по ней с центростремительным ускорением 1 м/с^2 при скорости 10 м/с ?
- *7. Постройте графики равномерного движения двух бегунов, стартующих из начала отсчета в противоположных направлениях с проекциями скоростей $v_{1x} = 5 \text{ м/с}$ и $v_{2x} = -8 \text{ м/с}$, соответственно. Определите графически расстояние между бегунами через 5 с после начала движения?
- *8. Постройте график скорости для тела, движущегося с ускорением 3 м/с^2 при начальной скорости, равной 2 м/с . Определите мгновенную скорость и пройденный путь за время, равное 4 с от начала движения.

Что освоили по этой теме?

Насколько полезна и интересна была для вас полученная информация?	Что еще вы хотели бы узнать по данной теме?	Какие вопросы возникли у вас в ходе изучения темы?

§ 4. Силы. Сложение сил. Законы Ньютона

Ключевые понятия: Законы Ньютона, сила, сложение сил, принцип относительности.

На этом уроке вы:

изучите законы движения тел и научитесь их применять.

Знание причинно-следственных связей между различными явлениями природы играет очень важную роль в практической деятельности людей. Когда одно явление порождает другое, то первое из них называют *причиной*, а другое — *следствием*. Таким образом, между явлениями существует причинно-следственная связь.

Раскрывая причинно-следственные связи тех или иных явлений, человек может ускорить наступление полезных явлений или ограничить действие нежелательных следствий, порождаемых явлениями. А незнание причинно-следственных связей между явлениями делает человека бессильным перед ними.

Причины, определяющие характер того или иного механического движения, изучает *динамика* (от лат. *dynamicis* — “сила”).

В основе динамики лежат три закона Ньютона.

Первый закон Ньютона. В начале XVII в. итальянским ученым Г. Галилеем был сформулирован принцип инерции, согласно которому, тела находятся в покое или движутся прямолинейно и равномерно, если на них не действуют другие тела или их действия скомпенсированы.

В 1687 г. принцип инерции Галилея был сформулирован И. Ньютоном в виде первого закона Ньютона. С точки зрения современных представлений первый закон Ньютона формулируется так: **существуют системы отсчета, относительно которых тело сохраняет свою скорость постоянной, если на него не действуют другие тела или действия других тел компенсируются.**

Такие системы отсчета называют *инерциальными*. Инерциальная система отсчета является идеализированной системой отсчета. Однако мы, земляне, в повседневной жизни в качестве инерциальной системы отсчета используем Землю, так как ускоренное движение Земли не оказывает существенного влияния на механические явления, происходящие на ее поверхности. Если поверхность Земли мы будем считать инерциальной, то инерциальными можно считать также системы отсчета, связанные с любым телом, которое покоится или движется равномерно и прямолинейно относительно нее. Какую систему отсчета выбрать для описания явлений, решают из соображений удобства.

Если вы собираетесь выполнять точные астрономические расчеты или запускать ракеты, то более удобными и точными окажутся системы отсчета, связанные с Солнцем и звездами.

Существуют системы отсчета, где первый закон Ньютона не выполняется. Системы отсчета, в которых изменение скорости тела может быть вызвано не только взаимодействием, но и ускоренным движением самой системы, называют *неинерциальными*. Например, когда автомобиль, в котором вы сидите, резко трогается с места, вас отбрасывает к спинке сиденья, если резко тормозит, вас бросает вперед в направлении движения автомобиля. Следовательно, ваша скорость относительно автомобиля изменяется в отсутствие внешних сил и система отсчета, связанная с автомобилем, является неинерциальной.

Второй закон Ньютона. Вы уже знаете, что в инерциальной системе отсчета тело движется прямолинейно и равномерно, когда отсутствует внешнее воздействие и в этом случае изменение скорости равно нулю. При воздействии на движущееся тело других тел скорость его изменяется. Причиной изменения скорости тела и, следовательно, появления у него ускорения является действие, оказываемое на него другими телами. Это действие характеризуется силой (рис. 4.1).

Сила — величина векторная. Результат ее действия зависит от ее модуля, направления и точки приложения.

Так, например, чем сильнее вы бьете ногой мяч, лежащий на земле, тем большую скорость он набирает при взаимодействии с вашей ногой, и тем большее ускорение при этом приобретает. Следовательно, ускорение тела пропорционально силе, действующей на тело: $\vec{a} \sim \vec{F}$.

Простые наблюдения и опыты показывают также, что ускорения, приобретаемые телами при действии на них одинаковых сил, зависят от массы этих тел. Так, например, при одинаковой силе удара мяч с меньшей массой приобретает большее ускорение, чем мяч с большой массой.

Итак, чем больше масса тела, тем меньшее ускорение оно приобретает при одной и той же действующей силе: $\vec{a} \sim \frac{1}{m}$.

Обобщая подобные опыты, Ньютон сформулировал важнейший закон движения:

Ускорение, приобретаемое телом, прямо пропорционально действующей на него силе и обратно пропорционально массе тела:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}. \quad (4.1)$$



Исаак Ньютон
(1643—1727)

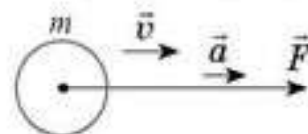


Рис. 4.1

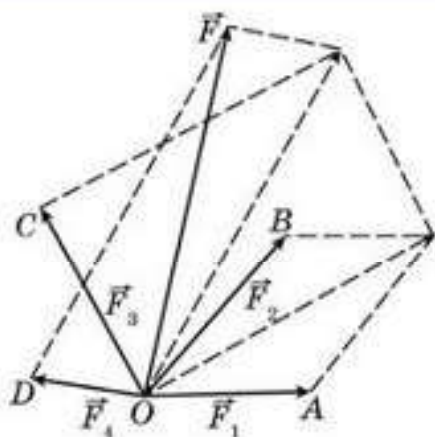


Рис. 4.2

Принцип независимости действия сил.

Одним из основных принципов классической механики является принцип независимости действия сил. Согласно данному принципу, если на тело одновременно действуют несколько сил, то каждая из них сообщает телу такое ускорение, какое она сообщала бы ему в отсутствие других сил. Так, если на тело действует n сил, то ускорение тела определяется равнодействующей всех сил:

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

Равнодействующая сила, действующая на тело со стороны других тел, равна векторной сумме сил, с которыми на него действует каждая из этих сил (рис. 4.2). Тогда второй закон Ньютона можем записать в виде:

$$\vec{a} = \frac{\Sigma \vec{F}}{m}. \quad (4.2)$$

Следовательно, прежде чем применять второй закон Ньютона, нужно предварительно найти векторную сумму всех сил, действующих на данное тело, и уже ее подставлять в формулу второго закона Ньютона.

Второй закон Ньютона часто записывают в следующем виде:

$$m\vec{a} = \Sigma \vec{F}. \quad (4.3)$$

Именно в этой форме применяют второй закон Ньютона при решении практических задач по динамике.

Третий закон Ньютона. При взаимодействии тел возникают силы действия и противодействия. Действительно, нельзя обнаружить, чтобы одно тело действовало на другое и не испытывало бы при этом ответного действия на себя. Действие одного тела на другое определяется силой \vec{F} . Значит, если одно тело действует на другое тело с силой \vec{F}_1 , то обязательно должна существовать ответная сила \vec{F}_2 , с которой второе тело будет действовать на первое, т. е.:

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2. \quad (4.4)$$

Это равенство выражает третий закон Ньютона, который формулируется следующим образом:

Действию всегда есть равное и противоположное противодействие: взаимные действия двух тел друг на друга равны между собой и направлены в противоположные стороны.

Поскольку силы, порождаемые взаимодействием тел, приложены к разным телам, они не компенсируют друг друга. Следует иметь в виду, что названные силы действуют вдоль одной прямой и имеют одинаковую природу. Так, например, сила, действующая на спортсмена со стороны строп парашюта \vec{F}_1 , равна по величине силе, действующей на стропы со стороны спортсмена \vec{F}_2 (рис. 4.3).



Рис. 4.3

Равенство сил действия и противодействия справедливо при любом соотношении масс взаимодействующих тел, движущихся с различными скоростями.

Принцип относительности. Принцип относительности является важным принципом классической механики. Этот принцип был сформулирован Г. Галилеем. Согласно принципу относительности, *законы механики одинаковы для всех инерциальных систем отсчета, т. е. все механические явления протекают одинаково во всех инерциальных системах отсчета при одинаковых начальных условиях.*

Третий закон Ньютона так же, как первый и второй законы, выполняется в инерциальных системах отсчета. При переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой не изменяются ни ускорение, ни масса тела, ни действующая на него сила. При переходе от одной к другой инерциальной системе отсчета могут изменяться некоторые характеристики движения, такие как скорость, перемещение или траектория движения. Однако законы движения в этих инерциальных системах отсчета остаются неизменными.

В начале XX в. выдающийся физик-теоретик А. Эйнштейн на основе этого принципа создал современную теорию относительности — одну из важнейших физических теорий нашего времени, с которой вы ознакомитесь в следующей главе.

Вопросы для самоконтроля

1. Одна инерциальная система отсчета известна. Как по движению другой системы отсчета установить, является ли она инерциальной или нет?
2. В каких случаях наблюдаются нарушения закона инерции в движениях тел относительно Земли? Приведите несколько примеров из своей личной практики, когда в выбранной вами системе отсчета происходило явление, противоречащее первому закону Ньютона.
3. Инерциальна ли система отсчета, движущаяся с ускорением относительно какой-либо другой инерциальной системы отсчета?

4. Направление какой векторной физической величины зависит от направления равнодействующей силы, приложенной к телу: скорости, перемещения или ускорения?
5. Равнодействующая всех сил, приложенных к телу, равна нулю. Может ли тело двигаться по прямой? Находиться в покое?
- *6. Что можно сказать о природе сил, возникающих при взаимодействии тел? Почему эти силы не уравновешивают друг друга?
7. В чем состоит принцип независимости сил?

Что освоили по этой теме?

Насколько полезна и интересна была для вас полученная информация?	Что еще вы хотели бы узнать по данной теме?	Какие вопросы возникли у вас в ходе изучения темы?

§5. Закон всемирного тяготения

Ключевые понятия: закон всемирного тяготения, ускорение свободного падения, сила тяжести, первая космическая скорость, вторая космическая скорость.

На этом уроке вы:

познакомитесь с законом всемирного тяготения и ускорением свободного падения.

Закон всемирного тяготения. Более трех веков назад люди считали, что небесные тела движутся по своим “совершенным” законам, а земные тела подчиняются своим “мирским” правилам. Открытием истины о справедливости единых законов во всей Вселенной мы обязаны И. Ньютону. В 1665 г. он предположил, что силы тяготения между всеми телами Вселенной должны иметь одну и ту же природу. В то время это была удивительная мысль. Теперь, когда мы живем в XXI в. и уже давно изменились наши представления о звездах, планетах, осуществляются полеты в космос, грандиозность открытия Ньютона кажется менее впечатляющей, чем в те времена. Однако, отметим, что И. Ньютону удалось получить строгое доказательство существования всемирного тяготения и показать, от каких величин зависят силы притяжения, лишь 20 лет спустя. Он, в течение многих лет изучая движение планет вокруг Солнца, Луны вокруг Земли и пользуясь законами Кеплера о движении планет, сформулировал закон всемирного тяготения (1687). Согласно закону всемирного тяготения, *все тела во Вселенной притягиваются друг другу с силой, прямо пропорциональной произведению их масс и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними:*

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad (5.1)$$

где m_1 и m_2 — массы тел; r — расстояние между ними (рис. 5.1); G — гравитационная постоянная, значение которой впервые было опре-

делено в 1798 г. соотечественником Ньютона Генри Кавендишем (1731—1810). Полученное им значение гравитационной постоянной мало отличается от значений, полученных в ходе последующих экспериментов. По современным данным гравитационную постоянную считают равной

$$G = 6,67259 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}.$$

Закон всемирного тяготения позволил вычислить массу Земли и Солнца и большинства планет, а также периоды их обращения. С помощью этого закона с огромной точностью по астрономическим данным определяются положения небесных тел и их движение.

Ускорение свободного падения. Одним из случаев проявлений всемирного тяготения является сила притяжения тел к центру Земли. Эту силу называют *силой тяжести* и она для нас, обитателей Земли, имеет огромное значение. Согласно закону всемирного тяготения, сила тяжести также выражается формулой

$$F_{\text{тяж}} = G \frac{mM_3}{R_3^2}, \quad (5.2)$$

где m — масса тела; M_3 — масса Земли; R_3 — радиус Земли. Сила тяжести направлена вертикально вниз, к центру Земли (рис. 5.2).

Сила тяжести — гравитационная сила, действующая на тело вследствие притяжения его Землей.

Величина $G \frac{M_3}{R_3^2}$ приблизительно постоянна, обозначается через g и называется *ускорением свободного падения*. Итак, $g = G \frac{M_3}{R_3^2}$. Действительно, если тело массой m находится вблизи Земли, то оно притягивается к Земле силой $F = G \frac{mM_3}{R_3^2}$. Эта сила сообщает телу ускорение в соответствии со вторым законом Ньютона $\vec{F} = m\vec{a}$. Тогда ускорение, которое приобретает тело под действием силы притяжения к Земле, определяется соотношением

$$a = g = G \frac{M_3}{R_3^2} = 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

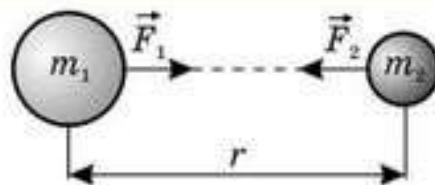


Рис. 5.1

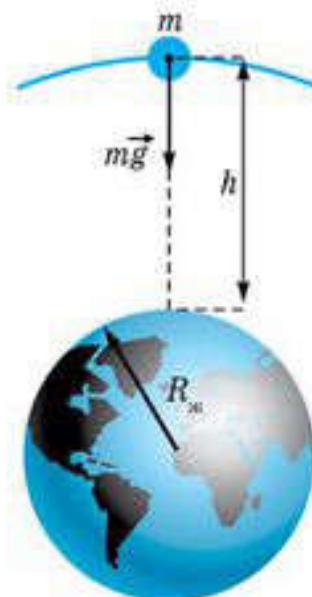


Рис. 5.2

Если же тело находится на высоте h от поверхности Земли, то расстояние между этим телом и центром Земли будет $R_3 + h$, тогда

$$g = G \frac{M_3}{(R_3 + h)^2}.$$

Значит, и сила тяжести, и ускорение свободного падения будут меньше, чем у поверхности Земли. Но уменьшение это обычно невелико, поскольку высота тела над Землей по сравнению с радиусом Земли пренебрежимо мала.

Закон всемирного тяготения позволяет определить ускорение свободного падения на поверхности любого небесного тела. Подставляя в формулу $g = G \frac{M}{R^2}$ соответствующие значения массы и радиуса рассматриваемой планеты или ее спутника, можно определить приближительное значение g на поверхности данного небесного тела.



Рис. 5.3

Космические скорости. В настоящее время вокруг Земли обращаются несколько тысяч искусственных спутников, выведенных на определенные орбиты с помощью мощных космических ракет. Множество спутников находятся на орбитах, удаленных от центра Земли на расстояния 38 000 км до 45 000 км (рис. 5.3). Эти спутники имеют периоды обращения, близкие к одним суткам. Движение спутников происходит по тем же законам, что и движение естественных небесных тел. При определенном значении начальной скорости

тело, брошенное по касательной к поверхности Земли, при отсутствии сопротивления воздуха, может двигаться по круговой орбите, не падая на Землю и не удаляясь от нее. Рассчитаем круговую скорость спутника Земли, учитывая, что спутник движется вокруг Земли по окружности, равной радиусу Земли R_3 :

$$v = \sqrt{G \frac{M_3}{R_3}}, \quad (6.2)$$

где M_3 — масса Земли; R_3 — радиус Земли. Подставляя численные значения, $M_3 = 5,98 \cdot 10^{24}$ кг, $R_3 = 6,37 \cdot 10^6$ м, получим значение первой космической скорости. Первая космическая скорость приблизительно равна $v_1 \approx 7,9$ км/с.

Минимальную скорость, которую нужно сообщить телу для того, чтобы оно стало искусственным спутником Земли, называют первой космической скоростью.

Параболическую скорость, равную $v_2 \approx 11,2$ км/с, называют *второй космической скоростью*. Спутник будет двигаться по параболе и уходить в космическое пространство, став искусственным спутником Солнца (рис. 5.4). Если скорость спутника лежит в пределах $v_1 < v < v_2$, то при такой скорости спутник будет двигаться по эллиптической траектории. При превышении третьей космической скорости, равной приблизительно $v_3 \approx 16,7$ км/с, космический аппарат, запускаемый с Земли, может, преодолев притяжение Земли и Солнца, уйти в межзвездное пространство.



Рис. 5.4

Вопросы для самоконтроля

1. Любое тело, находящееся на Земле, притягивается не только к Земле, но и ко всем другим телам, его окружающим. Почему мы этого не замечаем?
2. Содержится ли в законе всемирного тяготения Ньютона утверждение, что между двумя телами может действовать сила лишь одного вида и это есть гравитационная сила?
3. Какие тела называют *искусственными спутниками* ?
4. Почему спутники, обращаясь вокруг Земли, под действием силы тяжести не падают на Землю?
- *5. Можно ли создать такой спутник, чтобы он "висел" над одной и той же точкой Земли?

Пример решения задачи

Определите массу Солнца, считая орбиту Земли круговой, если скорость обращения Земли вокруг Солнца 30 км/с, а радиус земной орбиты $1,5 \cdot 10^8$ км.

Д а н о:

$$v = 30 \text{ км/с} = 3 \cdot 10^4 \text{ м/с}$$

$$R = 1,5 \cdot 10^8 \text{ км} = 1,5 \cdot 10^{11} \text{ м}$$

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}$$

M_c — ?

Решение. На Землю действует сила притяжения Солнца, которую рассчитывают по закону всемирного тяготения:

$$F \approx G \frac{M_c M_3}{R^2},$$

где M_c — масса Солнца; M_3 — масса Земли.

Эту же силу можно найти из второго закона Ньютона: $F = M_3 a$, где a — центростремительное ускорение Земли, т. е. $a_{цс} = \frac{v^2}{R}$.

После подстановки обеих формул в закон всемирного тяготения имеем:

$$M_3 \frac{v^2}{R} = G \frac{M_c M_3}{R^2} \Rightarrow G \frac{M_c}{R} = v^2.$$

Отсюда масса Солнца равна: $M_c = \frac{Rv^2}{G}$;

$$M_c = \frac{1,5 \cdot 10^{11} \text{ м} \cdot (3 \cdot 10^4 \text{ м/с})^2}{6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}} \approx 2 \cdot 10^{30} \text{ кг}.$$

Ответ : $2 \cdot 10^{30}$ кг.

Упражнение 2

1. Автомобиль массой 1500 кг начинает двигаться горизонтально с ускорением $0,5 \text{ м/с}^2$. Сопротивление движению 500 Н. Определите силу тяги, развиваемую двигателем.
2. Удар футболиста сообщает неподвижному мячу массой 500 г скорость 10 м/с. Определите среднюю силу удара, если он длился в течение 0,5 с; 1 с.
3. На каком расстоянии от Земли сила всемирного тяготения, действующая на тело, будет в три раза меньше, чем на поверхности Земли? Радиус Земли принять равным 6400 км.
4. На какой высоте от поверхности Земли ускорение свободного падения $g_h = 1 \text{ м/с}^2$?
5. Некая планета имеет такую же массу, как и Земля, но ее радиус в два раза меньше радиуса Земли. Чему равно ускорение свободного падения на поверхности планеты и на высоте 3200 км от ее поверхности?

Что освоили по этой теме?

Насколько полезна и интересна была для вас полученная информация?	Что еще вы хотели бы узнать по данной теме?	Какие вопросы возникли у вас в ходе изучения темы?

§ 6. Движение снаряда в гравитационном поле

Ключевые понятия: баллистика, внешняя баллистика, гравитационная сила.

На этом уроке вы:

научитесь определять кинематические величины тела, брошенного под углом к горизонту; исследуете траекторию тела, брошенного под углом к горизонту.

Рассмотрим движение тел под действием силы тяжести, с начальной скоростью, направленной под определенным углом к горизонту. Полет пуль и снарядов представляет собой пример движения тел, брошенных под углом к горизонту. Так движутся лыжник при прыжке с трамплина, спортсмен во время прыжка в длину, струя воды из шланга и т. д.

Изучением движения тел, брошенных под углом к горизонту, главным образом, артиллерийских снарядов, пуль, баллистических ракет, космических летательных аппаратов в поле тяжести Земли занимается **баллистика**.

Баллистика от греч. слова *ballo* — “брошаю” — наука о движении снарядов. Вы знаете, что Г. Галилей своими замечательными опытами доказал, что все свободные тела независимо от их масс падают на Землю с одним и тем же ускорением. Законы динамики, сформулированные Ньютоном, позволили объяснить движение тел под действием силы тяжести.

Баллистика разделяется на: 1) внутреннюю баллистику, изучающую движение снаряда внутри ствола; 2) внешнюю баллистику, изучающую движение снаряда по траектории. Знание внешней баллистики позволяет стрелку еще до выстрела знать, куда попадет пуля. Баллистические расчеты траекторий позволяют выводить космические аппараты на орбиту вокруг Земли и к другим планетам.

Посмотрим, как меняется скорость тела, брошенного под углом α к горизонту. В современной баллистике для решения подобных задач используется электронно-вычислительная техника, а мы ограничимся простым случаем — изучением такого движения, при котором сопротивлением воздуха можно пренебречь, поскольку большая часть траектории баллистических ракет достаточно большой дальности (более 500 км) проходит в разреженных слоях атмосферы, где сопротивление воздуха практически отсутствует.

Основателем современной баллистики принято считать И. Ньютона (1643—1727). Формулируя законы движения и рассчитывая траекторию материальной точки в пространстве, он опирался на математическую теорию динамики твердого тела, которую разработали И. Мюллер (Германия) и итальянцы Н. Фонтана и Г. Галилей в XV и XVI вв.

Криволинейное баллистическое движение тела можно рассматривать как результат сложения двух прямолинейных движений: равномерного движения по оси Ox и равнопеременного движения по оси Oy (рис. 6.1).

В горизонтальном направлении на тело никакие силы не действуют, если сопротивлением воздуха пренебречь, т.е. движение по оси Ox равномерное. На основании второго закона Ньютона движение снаряда вдоль этой оси будет равномерным, так как $a_x = 0$, тогда $v_{0x} = v_0 \cos \alpha$. Следовательно, горизонтальную дальность полета тела можно определить по формуле:

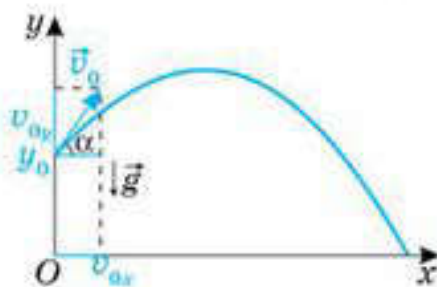


Рис. 6.1

$$x = v_{0x} t \quad \text{или} \quad x = v_0 \cos \alpha \cdot t.$$

А так как снаряд под действием силы тяжести падает на Землю, то его движение по оси Oy будет равноускоренным. Из второго закона Ньютона следует, что ускорение тела будет равно ускорению свободного падения:

$$m \vec{a} = m \vec{g}, \text{ откуда } \vec{a} = \vec{g}.$$

Тогда уравнение для вертикальной составляющей скорости можем записать в виде $v_y = v_0 + gt$, а для координаты Oy оно имеет вид:

$$y = y_0 + v_{0y}t - \frac{gt^2}{2}. \quad (6.1)$$

или

$$y = y_0 + v_0 \sin \alpha t - \frac{gt^2}{2}.$$

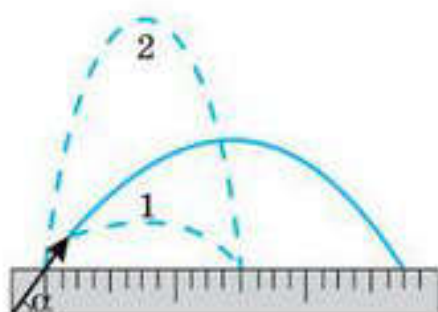


Рис. 6.2

Дальность полета тела, брошенного под углом к горизонту, зависит от величины начальной скорости и угла бросания. Проведем несколько опытов со струей воды, вытекающей из шланга, соединенного с краном (рис. 6.2). Направим струю воды из шланга под определенным углом к горизонту. Струя показывает нам траекторию движения частиц воды, выпущенных под углом α к горизонту:

траектория такого движения симметрична относительно наивысшей точки полета и форма струи представляет собой параболу.

Тело, брошенное под углом к горизонту, движется по параболе.

Для того чтобы установить связь между дальностью полета тела, брошенного под углом к горизонту, и углом бросания, изменим скорость вытекания струи из шланга с помощью крана. Можно заметить, что с увеличением начальной скорости растут дальность полета частиц воды по горизонтали и высота их подъема.

Опыт показывает, что дальность полета струи увеличивается с ростом угла α до 45° , а потом убывает. Следовательно, дальность полета тела наибольшая, если его начальная скорость направлена к горизонту под углом $\alpha = 45^\circ$. Когда угол бросания составляет 30° или 60° , то дальность полета тел для обоих углов оказывается одинаковой. Для углов бросания 75° и 15° дальность полета будет опять одна и та же, но меньше, чем при предыдущих углах бросания.

Однако форма баллистической траектории тел, проходящих в плотных слоях атмосферы, зависит от многих факторов: начальной скорости тела, его формы и массы, состояния атмосферы на траектории (температура, давление, плотность) и др. Форма баллистической траектории в этом случае обычно рассчитывается методом численного интегрирова-

ния дифференциальных уравнений движения снаряда в стандартной атмосфере.

Если тела движутся с большими скоростями, то на их движении сильно сказывается сопротивление воздуха. Если, например, начальная скорость пули равна 870 м/с и направлена к горизонту под углом 45° при отсутствии сопротивления воздуха, то дальность полета пули должна равняться 77 км. В действительности реальная дальность полета не превышает 3,5 км.

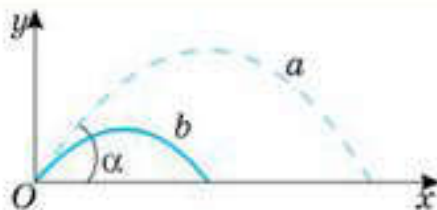


Рис. 6.3

На рисунке 6.3 пунктиром показана идеальная траектория движения снаряда, вылетевшего из ствола пушки с большой начальной скоростью, а сплошной линией — действительная траектория полета снаряда при тех же условиях выстрела.

Вопросы для самоконтроля

1. По какой траектории движется тело, брошенное под углом к горизонту?
2. Что изучает внутренняя и внешняя баллистика?
3. При каком угле бросания дальность полета будет наибольшей?
4. Как можно рассчитать горизонтальную дальность полета и высоту подъема тела?
5. Почему снаряды не движутся по расчетным траекториям?

Пример решения задачи

На какой высоте h от поверхности Земли ускорение свободного падения $g_h = 1 \frac{M}{c^2}$?

Д а н о:

$$g_h = 1 \frac{M}{c^2}$$

$$g = 9,8 \frac{M}{c^2}$$

$$R_3 = 6400 \text{ км} = 6,4 \cdot 10^6 \text{ м}$$

h — ?

Решение. Ускорение свободного падения на высоте h над Землей определяется по формуле:

$$g_h = G \frac{M_3}{(R_3 + h)^2},$$

а на поверхности Земли $\frac{M_3}{R_3^2}$.

Из этих уравнений получим $\frac{g_h}{g} = \frac{R_3^2}{(R_3 + h)^2}$. Выразим отсюда h :

$$(R_3 + h)^2 = \frac{gR_3^2}{g_h}; \quad h = R_3 \sqrt{\frac{g}{g_h}} - R_3;$$

$$h = 6,4 \cdot 10^6 \cdot \sqrt{\frac{9,8 M/c^2}{1 M/c^2}} - 6,4 \cdot 10^6 \text{ м} \approx 1,36 \cdot 10^7 \text{ м} \approx 1,36 \cdot 10^4 \text{ км}.$$

Ответ: $1,36 \cdot 10^4 \text{ км}$.

Упражнение 3

1. Приведите примеры движения тел, начальная скорость которых направлена под углом к горизонту, а движение происходит под действием силы тяжести.
2. Струя воды вылетает из трубки под углом 30° к горизонту со скоростью 10 м/с . Найдите время полета, дальность полета и наибольшую высоту подъема струи.
3. Теннисист метнул теннисный мячик под углом 45° к горизонту. Наибольшая высота, которой достиг мячик, 10 м . На какое расстояние удалось метнуть мячик теннисисту?
4. Какую скорость должен иметь спутник Земли, движущийся по круговой орбите на высоте 1700 км от поверхности Земли?
5. Рассчитайте первую космическую скорость на высоте трех земных радиусов над поверхностью Земли. На поверхности Земли ускорение свободного падения принять равным 10 м/с^2 , а радиус Земли — 6400 км .
6. Определите скорость искусственного спутника Земли, если он движется по круговой орбите на высоте 2600 км над поверхностью Земли.

Что освоили по этой теме?

Насколько полезна и интересна была для вас полученная информация?	Что еще вы хотели бы узнать по данной теме?	Какие вопросы возникли у вас в ходе изучения темы?

§ 7. Центр масс. Виды равновесия

Ключевые понятия: статика, равновесие тел, момент силы, плечо силы, центр масс.

На этом уроке вы:

познакомитесь с основными понятиями статики; научитесь определять равновесное состояние, центр масс тел.

Раздел механики, изучающий условия равновесия твердого тела, называется *статикой*.

Равновесием называется состояние тела, когда оно находится в покое или в состоянии равномерного прямолинейного движения.

Однако определить условия равновесия тела достаточно трудно, так как при действии сил тела деформируются, что влияет на условия равновесия. Для простоты договоримся, что деформацией тел будем пренебрегать. Тела, деформацией которых можно пренебречь, т. е. взаиморасположение частей которых при движении не изменяется, называют *абсолютно твердыми*.

Из второго закона Ньютона следует, что если векторная сумма всех сил, приложенных к телу, равна нулю, то тело находится в состоянии покоя или движется равномерно и прямолинейно. В этом случае говорят, что силы, приложенные к телу, уравнивают друг друга. Отсюда следует **первое условие равновесия**: тело находится в равновесии, если равнодействующая всех сил, приложенных к телу, равна нулю

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots + \vec{F}_n = 0 \text{ или } \sum_{i=1}^n \vec{F}_i = 0. \quad (7.1)$$

Если же тело может вращаться относительно некоторой оси, то первого условия равновесия недостаточно. В этом случае возникают моменты сил, которые стремятся повернуть тело либо по часовой стрелке, либо против часовой стрелки.

Под моментом сил понимают физическую величину, равную произведению модуля силы F на плечо d , т. е.

$$M = Fd. \quad (7.2)$$

Плечо — это кратчайшее расстояние от линии действия силы до оси вращения.

Отсюда следует **второе условие равновесия**: тело, имеющее неподвижную ось вращения, будет находиться в равновесии, если алгебраическая сумма моментов всех приложенных к телу сил относительно этой оси равна нулю

$$\overline{M}_1 + \overline{M}_2 + \dots + \overline{M}_n = 0. \quad (7.3)$$

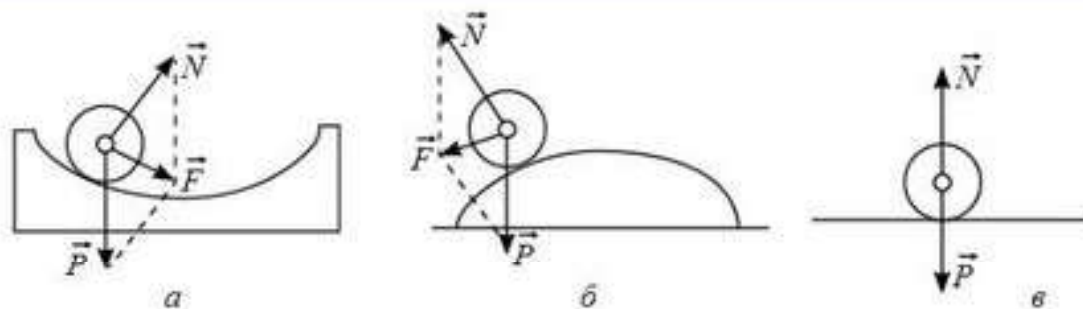


Рис. 7.1

Моменты сил, вращающие тело по часовой стрелке, считаются положительными, а моменты сил, которые стремятся повернуть тело против часовой стрелки — отрицательными.

Предлагаем вам порассуждать о том, почему у автомашин, велосипедов и т. п. тормоза лучше ставить на задние, а не на передние колеса.

Положение тела, в котором все силы, действующие на тело, взаимно уравновешиваются, называют *положением равновесия*. Равновесие называется *устойчивым*, если при отклонении тела от положения равновесия действующие на него в этом случае силы такие, что под их действием тело возвращается к положению равновесия (рис. 7.1. а). Если изменившиеся силы такие, что они вызывают дальнейшее отклонение тела от положения равновесия и тело не будет оставаться вблизи положения равновесия, то равновесие называется *неустойчивым* (рис. 7.1. б). Равновесие называется *безразличным*, если при отклонении тела от положения равновесия изменившиеся силы уравновешивают одна другую при любом новом положении тела (рис. 7.1. в).

Условие равновесия тел под действием силы тяжести определяется положением центра масс тела. *Центр масс* тела есть точка приложения равнодействующей силы тяжести, равной сумме сил тяжести, действующих на элементы его массы. Положение центра масс тела, состоящего из n частей с массами $m_1, m_2, m_3, \dots, m_n$, определяется *радиус-вектором*

$$\vec{R}_c = \frac{m_1 \vec{r}_1 + m_2 \vec{r}_2 + m_3 \vec{r}_3 + \dots + m_n \vec{r}_n}{m_1 + m_2 + m_3 + \dots + m_n} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \vec{r}_i}{\sum_{i=1}^n m_i}.$$

Общее условие устойчивого равновесия: *если центр масс тела занимает наинизшее положение из всех возможных, то равновесие устойчиво.*

Подумайте над тем, как будет меняться устойчивость лодки, если сидящий в ней человек встает во весь рост.

Вопросы для самоконтроля

1. Что называется *равновесием тел*?
2. Какие виды равновесия вы знаете?
3. Каковы условия равновесия тела, не имеющего оси вращения?

4. Что называется *моментом силы*?
5. Что называется *плечом силы*?
- *6. В чем заключается условие равновесия тела, имеющего ось вращения?
7. Дайте определение центра масс.

Пример решения задачи

Пять шаров, массы которых соответственно равны $m, 2m, 3m, 4m, 5m$, укреплены на невесомом стержне так, что их центры находятся на расстоянии l друг от друга. Найдите положение центра тяжести этой системы (рис. 7.2).

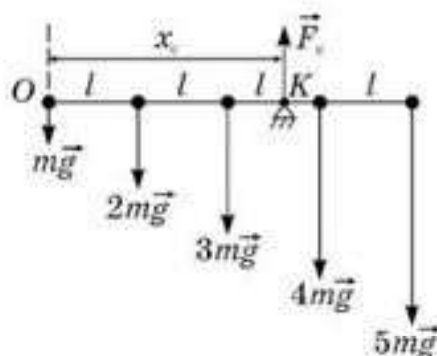


Рис. 7.2

Решение. Положение центра тяжести будем определять относительно точки O , находящейся на левом конце стержня. Заранее мы не знаем, где находится центр тяжести (здравый смысл подсказывает, что где-то ближе к правому концу). Пусть это будет точка K , находящаяся на расстоянии x_c от точки O , т.е. в этой точке можно подставить призму и стержень будет находиться в равновесии. Запишем уравнение моментов сил относительно точки O :

$$2mg \cdot l + 3mg \cdot 2l + 4mg \cdot 3l + 5mg \cdot 4l = F_c x_c.$$

Слева этого равенства — моменты сил тяжести, действующих на стержень по часовой стрелке, справа — момент силы реакции опоры, действующей на стержень против часовой стрелки. Так как стержень по вертикали не движется, то $F_c = mg + 2mg + 3mg + 4mg + 5mg$.

Окончательно имеем $x_c = \frac{2mg \cdot l + 3mg \cdot 2l + 4mg \cdot 3l + 5mg \cdot 4l}{mg + 2mg + 3mg + 4mg + 5mg}$ или $x_c = \frac{8}{3}l$.

Можно решить и по-другому. В общем виде положение центра тяжести для системы частиц $m_1, m_2, m_3, \dots, m_n$, координаты которых относительно выбранной точки O соответственно равны $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$,

определяется уравнением $x_c = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2 + m_3 x_3 + \dots + m_n x_n}{m_1 + m_2 + m_3 + \dots + m_n}$.

Ответ: $\frac{m_1 x_1 + m_2 x_2 + m_3 x_3 + \dots + m_n x_n}{m_1 + m_2 + m_3 + \dots + m_n}$.

Что освоили по этой теме?

Насколько полезна и интересна была для вас полученная информация?	Что еще вы хотели бы узнать по данной теме?	Какие вопросы возникли у вас в ходе изучения темы?
---	---	--

§ 8. Сообщающиеся сосуды. Применение закона Паскаля

Ключевые понятия: гидростатическое давление, сообщающиеся сосуды; гидростатический парадокс.

На этом уроке вы:

узнаете, какое давление называется *гидростатическим*; научитесь по формуле рассчитывать величину гидростатического давления; узнаете, какие сосуды называются *сообщающимися*; научитесь объяснять поведение жидкости в сообщающихся сосудах.

Сообщающиеся сосуды. *Сосуды, имеющие общую часть, заполненную покоящейся жидкостью, называются сообщающимися сосудами.* Примерами сообщающихся сосудов могут служить: чайник, лейка, кофейник (рис. 8.1). Свойство жидкости передавать давление по всем направлениям позволит нам объяснить принцип действия сообщающихся сосудов.

Опыт 1. Если возьмем две стеклянные трубки и соединим их прозрачной резиновой трубкой (рис. 8.2), то получатся сообщающиеся сосуды.

С помощью лабораторного зажима пережмем резиновую трубку посередине. Нальем в левую трубку воду, откроем зажим. Вода будет перетекать из левой трубки в правую, пока уровни воды не установятся и не будут одинаковыми. Возникает вопрос: почему же вода установилась на одном уровне?

Чтобы ответить на этот вопрос, рассчитаем давление, оказываемое водой, находящейся справа и слева, ровно посередине резинового шланга. Величину давления жидкости (воды) можно найти по формуле:

$$p_1 = \rho g h_1, \quad p_2 = \rho g h_2. \quad (8.1)$$

Жидкость однородная, поэтому и плотность ее одинаковая. Как показывает опыт, уровни воды в трубках сравнялись, следовательно, давление справа и слева одинаковое.



Рис. 8.1



Рис. 8.2

Итак, в сообщающихся сосудах поверхности однородной жидкости устанавливаются на одном уровне.

Опыт 2. При замене левой трубки трубкой большего диаметра, если повторить опыт 1, мы увидим, что, когда уровни воды в трубках сравняются, резиновая трубка деформирована не будет. Значит, и в этом случае давление справа и слева одинаковое.

Если в данный момент перегородку разорвать, то вода в правой и левой частях останется на прежнем уровне. Этот факт выглядит странным. Несмотря на то, что в правом колене сообщающегося сосуда масса воды больше, а в левом — меньше, давление на перегородку оказалось одинаковым. Это явление только на первый взгляд кажется парадоксальным.

Опыт 3. Возьмем сообщающиеся сосуды различной формы (рис. 8.3) и заполним их водой. Опыт покажет, что однородная жидкость в них установится на одном уровне. Это явление назвали **гидростатическим парадоксом**.

Опыт 4. Выясним, как будут себя вести разнородные жидкости, залитые в сообщающиеся сосуды. Для этого повторим опыт 1, наливая в правое колено U-образной трубки воду, а в левое — растительное масло на одинаковом уровне. После того как зажим, установленный ровно посередине прозрачного шланга, будет открыт, вода начнет перетекать в левое колено U-образной трубки, вытесняя масло (рис. 8.4).

Будем доливать масло в левое колено до тех пор, пока граница раздела жидкостей не окажется на уровне AB . Это будет означать, что давление столба масла $h_M = h_1$ уравновешивается давлением столба воды $h_B = h_2$, т. е.:

$$p_1 = \rho_1 g h_1, \quad p_2 = \rho_2 g h_2.$$

Так как $p_1 = p_2$, то $\rho_1 g h_1 = \rho_2 g h_2$. Тогда

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1}. \quad (8.2)$$

Из формулы (8.2) следует, что в сообщающихся сосудах высоты столбов разнородных жидкостей обратно пропорциональны их плотностям.

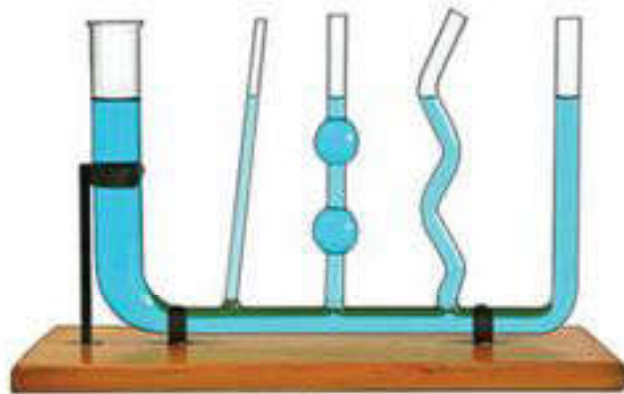


Рис. 8.3

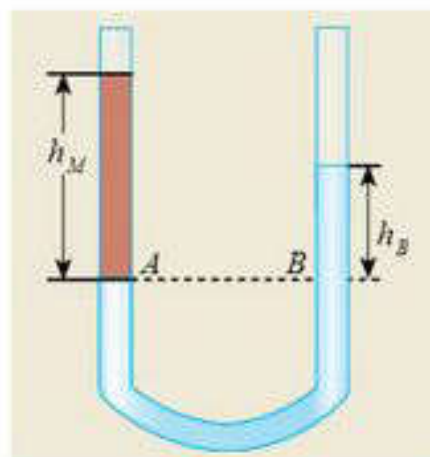


Рис. 8.4



Рис. 8.5

Сообщающиеся сосуды представляют практический интерес. На этом принципе работают и водомерные трубки, которые показывают уровень жидкости в непрозрачном сосуде, и шлюзы рек и каналов, которые позволяют судам проплывать пороги, и водопровод, который снабжает водой высотные здания. Таких примеров можно привести множество.

Гидростатическое давление. На любое тело, находящееся на Земле, действует сила тяжести, и поэтому любая жидкость в сосуде будет оказывать давление на дно и стенки сосуда.

Опыт 5. Используя мембранный манометр (рис. 8.5, а), с помощью которого измеряют давление, исследуем, как меняется давление жидкости с глубиной. Для этого опустим в жидкость на небольшую глубину мембранный манометр и будем его перемещать как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости. При перемещении манометра в горизонтальной плоскости его показания не изменяются, что согласуется с законом Паскаля. *Давление, производимое на жидкость или газ, пере-*

дается по всем направлениям без изменения. Из курса 7 класса вам известно, что это утверждение называется **законом Паскаля**.

При перемещении же манометра в вертикальной плоскости показания манометра с ростом глубины его погружения в жидкость повышаются. Это говорит о том, что с увеличением глубины давление жидкости на дно и стенки сосуда возрастает.

Рассчитаем величину этого давления. Чтобы упростить расчеты, воспользуемся сосудом цилиндрической формы с площадью основания S . Нальем в сосуд жидкость плотностью ρ массой m до уровня h (рис. 8.5, б).

Давление, которое оказывает жидкость на дно сосуда, определим по формуле $p = \frac{F}{S}$. В нашем случае $F = mg$. Тогда давление жидкости на дно сосуда будет равно: $p = \frac{F}{S} = \frac{mg}{S}$. Массу жидкости выразим через ее плотность и объем: $m = \rho V$. Так как объем жидкости, находящейся в цилиндрическом сосуде, равен $V = Sh$, то масса жидкости в сосуде будет равна: $m = \rho Sh$. Тогда давление, которое оказывает жидкость на дно сосуда, будет равно:

$$p = \frac{mg}{S} = \frac{\rho Shg}{S} = \rho gh, \text{ т. е. } p = \rho gh. \quad (8.3)$$

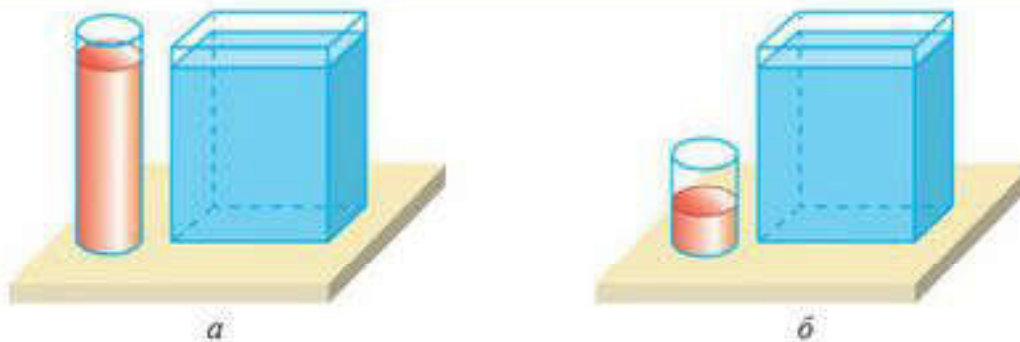


Рис. 8.6

Давление жидкости, рассчитываемое по формуле (8.3), называется **гидростатическим давлением**. Из формулы (8.3) следует, что *давление жидкости, на которую действует сила тяжести, не зависит от площади дна сосуда, а зависит только от высоты столба жидкости и ее плотности.*

Например, давление столба ртути на дно сосуда в 13,6 раза больше давления столба воды такой же высоты (рис. 8.6, а).

Если взять два сосуда и налить в них ртуть и воду так, чтобы высота столба воды была в 13,6 раза больше, то давление на дно в обоих сосудах будет одинаковым, независимо от размеров сосудов (рис. 8.6, б).

Многие устройства и сооружения работают за счет создания в них гидростатического давления. Например, водопровод, канализация, шлюзы, водяные мельницы, сообщающиеся сосуды и многое др. Система орошения и полива тоже основана на гидростатическом давлении. Раньше многие фонтаны работали благодаря гидростатическому давлению.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие сосуды называются «сообщающимися»?
2. Как соотносятся высоты однородных жидкостей в сообщающихся сосудах?
3. Как соотносятся высоты разнородных жидкостей в сообщающихся сосудах?
4. Приведите примеры использования сообщающихся сосудов в быту, технике, в окружающем нас мире.
5. Какое давление называется «гидростатическим»?
6. Как рассчитать величину гидростатического давления?
- *7. Как зависит гидростатическое давление на дно сосуда от площади его дна?
- *8. Приведите примеры использования гидростатического давления в быту.
9. Объясните принцип действия водяной мельницы.
- *10. Попробуйте объяснить, какую цель преследуют, когда строят высокие плотины, перегораживая русла рек?

Что освоили по этой теме?

Насколько полезна и интересна была для вас полученная информация?	Что еще вы хотели бы узнать по данной теме?	Какие вопросы возникли у вас в ходе изучения темы?

§ 9. Атмосферное давление. Опыт Торричелли

Ключевые понятия: атмосферное давление, нормальное атмосферное давление.

На этом уроке вы:

научитесь объяснять природу атмосферного давления; выясните единицу измерения атмосферного давления.

Все вы знаете, что на Земле есть суша, водное и воздушное пространства. Люди и животные, перемещающиеся по суше, а также здания и сооружения оказывают давление на поверхность Земли. Причем давление это передается в направлении действия силы тяжести, т. е. по направлению к центру Земли.

Земля окружена воздушной оболочкой, называемой *атмосферой*. Возникает вопрос: оказывает ли воздух давление на поверхность Земли? Проведем следующий опыт.

Опыт 1. Возьмем стеклянную колбу емкостью 1 л с резиновой трубкой с зажимом. Колбу герметично закроем пробкой. Накачаем насосом воздух в колбу и взвесим ее (рис. 9.1). Затем откачаем воздух из колбы и снова ее взвесим. Мы обнаружим, что равновесие весов нарушится и гиря немного перевесит. Значит, воздух имеет массу. Масса 1 л воздуха приблизительно равна 1,3 г. Это означает, что на воздух действует сила тяжести, и он оказывает давление на поверхность Земли, в частности, на дно сосуда. Наш опыт позволяет утверждать, что воздух оказывает давление. В отличие от давления, создаваемого твердыми телами, давление столба воздуха в соответствии с законом Паскаля передается по всем направлениям одинаково. В существовании атмосферного давления можно убедиться и на следующем опыте.



Рис. 9.1

Опыт 2. Поместим на тарелку воздушного насоса завязанный воздушный шарик. Накроем тарелку стеклянным колоколом (рис. 9.2) и начнем откачивать из-под него воздух. По мере уменьшения давления под колоколом будет наблюдаться раздувание воздушного шарика. Это говорит о том, что давление в шарике, изначально равное атмосферному, стало преобладать над давлением под колоколом.

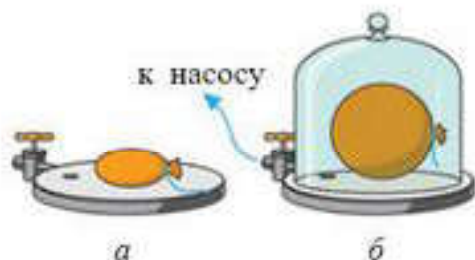


Рис. 9.2

Атмосферным давлением называется давление воздушной оболочки Земли на ее поверхность и находящиеся на ней тела.

В 1654 г. немецкий физик Отто фон Герике в г. Магдебурге проделал опыт, поразивший его современников. Два больших стальных полушария он плотно прижал друг к другу и выкачал из них воздух. Разорвать их не смогли даже 8 пар лошадей, которые тянули полушария в разные стороны. Настолько велика сила атмосферного давления. Этот факт в физике называют “магдебургскими полушариями”.

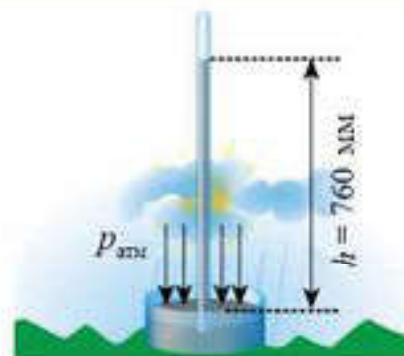


Рис. 9.3

Численное значение атмосферного давления впервые измерил итальянский физик Э. Торричелли (1608—1647) в 1643 г. По поручению своего учителя Г. Галилея он проделал следующий опыт. Взял стеклянную трубку длиной 1 м, запаянную с одного конца, и наполнил ее ртутью. Закрыв открытый конец трубки, он перевернул ее и опустил открытым концом в чашу, заполненную ртутью. Часть ртути из трубки вылилась в чашу (рис. 9.3).

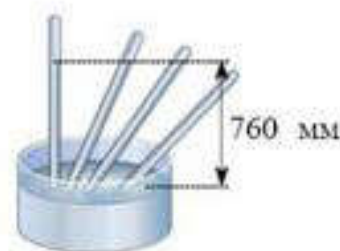


Рис. 9.4

Оставшийся в трубке столб ртути имел высоту около 760 мм. Это объясняется тем, что давление столба ртути в трубке высотой 760 мм компенсируется давлением атмосферы, производимым на поверхность ртути, находящейся в чаше. Если трубки наклонять, то высота ртутного столба останется такой же (рис. 9.4).

Благодаря опыту Торричелли в физике была введена внесистемная единица измерения давления — мм рт. ст.

$$1 \text{ мм рт. ст.} = 133,3 \text{ Па.}$$

В атмосфере Земли постоянно происходят различные процессы: движение воздушных масс, выпадение осадков, нагревание и охлаждение воздуха за счет солнечной энергии. Эти процессы приводят к тому, что атмосферное давление в данной местности непрерывно изменяется.

Атмосферное давление, равное давлению столба ртути высотой 760 мм, называется нормальным атмосферным давлением.

Атмосферное давление зависит не только от температуры воздуха, но и от высоты местности. Это было установлено Б. Паскалем в 1647 г.

Вопросы для самоконтроля

1. Какое давление называется “атмосферным” и почему оно возникает?
2. Каким образом можно доказать существование атмосферного давления?
3. Какая физическая величина измеряется в 1 мм рт. ст.?
4. Какое давление называют “нормальным атмосферным давлением”?
5. От каких величин зависит атмосферное давление?
6. Одинаково ли атмосферное давление на первом и последнем этажах небоскреба?

Что освоили по этой теме?

Насколько полезна и интересна была для вас полученная информация?

Что еще вы хотели бы узнать по данной теме?

Какие вопросы возникли у вас в ходе изучения темы?

§ 10. Законы сохранения импульса и механической энергии

Ключевые понятия: закон сохранения импульса, энергия, работа, кинетическая и потенциальная энергия, закон сохранения энергии.

На этом уроке вы:

научитесь применять закон сохранения импульса и энергии при решении задач, понятие энергии для расчета работы различных сил.

С помощью законов Ньютона мы можем решать различные практические задачи, касающиеся движения и взаимодействия тел, если заданы начальные условия и силы, действующие на тело. Но часто эти величины бывают неизвестны. Поэтому для решения многих задач практического характера используют физические величины, сохраняющиеся при определенных условиях.

Закон сохранения импульса. Импульс представляет собой одну из таких немногих физических величин, которые при взаимодействии тел всегда сохраняются.

Обратимся к третьему закону Ньютона, описывающему взаимодействие тел. Пусть взаимодействуют два тела массами m_1 и m_2 , имеющие скорости \vec{v}_1' и \vec{v}_2' (рис. 10.1). Силы взаимодействия, какими бы они ни были, связаны с третьим законом Ньютона: $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$ или

$$m_1 \frac{\vec{v}_1' - \vec{v}_1}{\Delta t} = -m_2 \frac{\vec{v}_2' - \vec{v}_2}{\Delta t},$$

где \vec{v}_1 и \vec{v}_2 — скорости тел непосредственно перед взаимодействием; \vec{v}_1' и \vec{v}_2' — скорости тел сразу после взаимодействия; Δt — промежуток времени, в течение которого происходило взаимодействие.

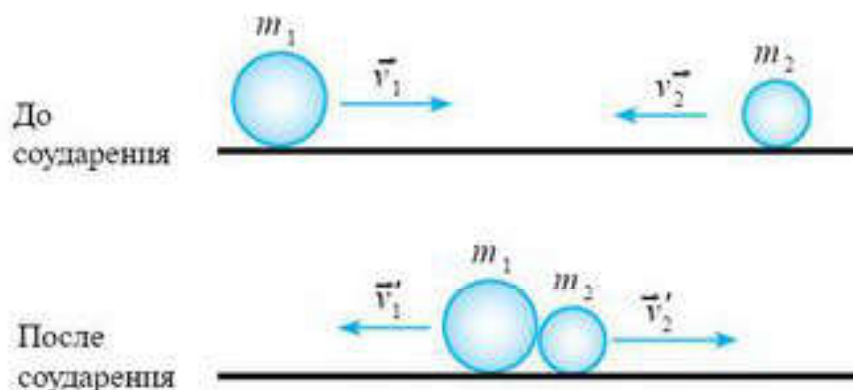


Рис. 10.1

Проведем небольшое преобразование и запишем выражение в виде

$$m_1 \vec{v}'_1 + m_2 \vec{v}'_2 = m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2, \quad (10.1)$$

или

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \vec{p}'_1 + \vec{p}'_2.$$

Присмотревшись к полученному уравнению, приходим к выводу: *сумма импульсов тел до взаимодействия равен сумме импульсов тел после взаимодействия*. Импульс каждого из них при взаимодействии изменился, но векторная сумма их импульсов осталась неизменной.

Рассмотренная система состояла из двух тел. Полученные выводы справедливы и в случае, когда система состоит из любого числа тел, взаимодействующих между собой и является замкнутой.

Замкнутая система — система тел, для которой равнодействующая внешних сил равна нулю, т. е. тела, составляющие замкнутую систему, взаимодействуют между собой, но не взаимодействуют с другими телами.

Когда два или более тела взаимодействуют между собой, то могут происходить самые разнообразные изменения. Например, при выстреле из пушки салютными снарядами осколки разлетаются в разные стороны и кажется, что ничто не остается прежним. Изменяются цвет, форма, положение и скорость осколков. И все это происходит за крайне малое время. Однако начальный импульс снаряда остается неизменным. Это условие накладывает жесткие ограничения на относительные скорости и направления движения осколков.

Равенство (10.1) называют **законом сохранения импульса**. Закон сохранения импульса является фундаментальным законом природы и читается следующим образом: **векторная сумма импульсов тел, составляющих замкнутую систему, остается постоянной при любых взаимодействиях этих тел между собой.**

В повседневной речи мы часто используем слово *энергия*. Представление о ней связано у нас в основном с нефтью, углем, газом, водопадом, продуктами питания. Энергия проявляется в различных формах (механическая, внутренняя, электромагнитная, ядерная и др.). Энергия, изучаемая в механике, называется **механической**. Механическая энергия бывает двух видов — *кинетической* и *потенциальной*.

Закон сохранения энергии. Кинетическая энергия. Термин *кинетическая энергия* был введен в начале XIX в. английским ученым Томасом Юнгом (1773—1829). Под словом *энергия* он понимал способность тела производить работу вследствие приобретенной скорости.

Энергия выражается в тех же единицах, что и работа, т. е. в **джоулях (Дж)**.

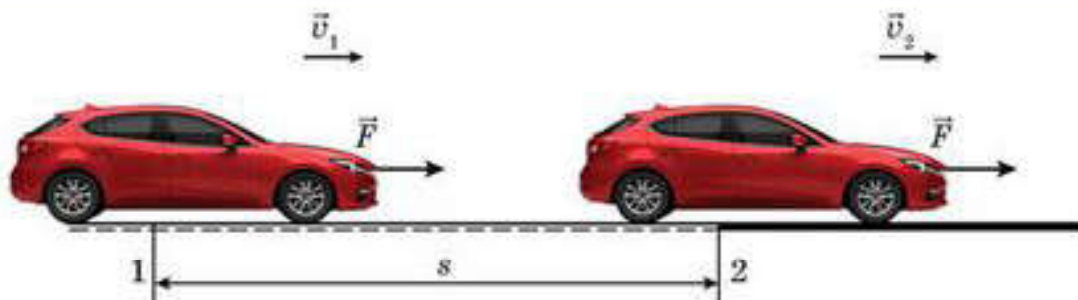


Рис. 10.2

Итак, мы установили, что для совершения работы на движущееся тело все время должна действовать сила. О теле, которое способно совершить механическую работу, говорят, что оно обладает механической энергией.

Пусть тело (в нашем случае автомобиль) массой m имеет некоторую начальную скорость \vec{v}_1 и движется прямолинейно и равноускоренно под действием постоянной силы тяги \vec{F} (рис. 10.2). Под действием этой силы автомобиль перемещается на расстояние s , и скорость его движения изменяется от \vec{v}_1 до \vec{v}_2 .

Модуль перемещения при прямолинейном равноускоренном движении мы можем вычислить по формуле (см. § 1):

$$s = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2a}. \quad (10.2)$$

Подставив в формулу: $A = F \cdot s \cdot \cos \alpha$ выражения для модулей силы $F = ma$ и перемещения (10.2), вычислим работу силы:

$$A = ma \frac{v_2^2 - v_1^2}{2a} \cos 0^\circ = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}.$$

Величину $E_k = \frac{mv^2}{2}$ — *произведение половины массы тела на квадрат скорости* называют **кинетической энергией**, тогда

$$A = E_{k2} - E_{k1}. \quad (10.3)$$

Итак, совершаемая силой работа идет на изменение кинетической энергии тела, и это утверждение составляет смысл одной из общих теорем динамики — *теоремы об изменении кинетической энергии*. Отметим, что эта теорема верна для замкнутой системы тел. Эта теорема утверждает, что, иными словами, кинетическая энергия возрастает на величину работы, совершаемой силой.

Потенциальная энергия. Кинетическую энергию можно назвать и *энергией движения*, поскольку она связана со скоростью тела. Между тем существует и другой тип энергии — *потенциальная энергия*.

Понятие *потенциальная энергия* впервые введено в конце XVIII в. в работах французского инженера и математика Лазара Карно (1753—1823).

Как вам известно, *потенциальной энергией взаимодействующих тел называется энергия, зависящая от взаимного расположения этих тел.*

Во многих случаях потенциальную энергию можно преобразовать в другие формы энергии.

Рассмотрим более общий случай, когда тело массой m падает с высоты H на поверхность Земли (рис. 10.3).

В результате взаимодействия с Землей на тело действует сила тяжести

$\vec{F}_{\text{тяж}} = m\vec{g}$, направленная вниз. Выделим два промежуточных состояния, при которых $s = h = h_1 - h_2$. В первом состоянии тело находится на высоте h_1 , во втором — h_2 над некоторым уровнем. Тогда работа силы тяжести равна:

$$A = F_{\text{тяж}} s \cos\alpha = mg(h_1 - h_2) = -(mgh_2 - mgh_1), \quad (10.4)$$

где $\alpha = 0$, т. е. $\cos\alpha = 1$.

Правая часть этого равенства представляет собой изменение величины mgh , взятое с обратным знаком, которое означает, что при падении тела величина mgh уменьшается.

Величину mgh называют *потенциальной энергией взаимодействия тела и Земли*. Обозначим потенциальную энергию через E_p , тогда

$$E_p = mgh. \quad (10.5)$$

С учетом (10.5) выражение для работы (10.4) запишется так:

$$A = -(E_{p2} - E_{p1}). \quad (10.6)$$

Это есть *теорема о потенциальной энергии*.

Из формулы (10.6) видно, что значение потенциальной энергии тел, поднятых над поверхностью Земли, определяется высотой. Чем выше тело поднято над Землей, тем больше его потенциальная энергия.

И в природе, и в технике происходит постоянное превращение одного вида механической энергии в другой. Движение маятника — пример непрерывного взаимного превращения потенциальной и кинетической энергий. Когда груз маятника проходит через низшую точку, его по-

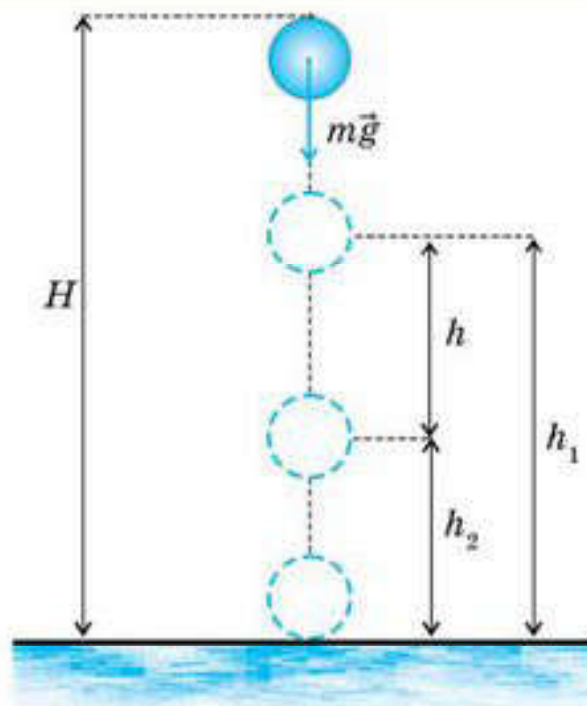


Рис. 10.3

тенциальная энергия полностью превращается в кинетическую, а затем, когда груз поднимается, кинетическая энергия снова превращается в потенциальную.

Когда мяч падает с определенной высоты, запасенная им потенциальная энергия превращается в кинетическую. Однако при подъеме вверх его кинетическая энергия уменьшается, а потенциальная энергия будет увеличиваться. Таким образом, происходит поочередное превращение одного вида энергии в другой. При малом трении и сопротивлении такие движения будут происходить достаточно долго. Согласно теореме об изменении кинетической энергии, работа силы тяжести над телом при падении равна изменению его кинетической энергии:

$$A = E_{k_2} - E_{k_1}. \quad (10.7)$$

По теореме о потенциальной энергии работа силы тяжести равна:

$$A = -(E_{p_2} - E_{p_1}). \quad (10.8)$$

Левые части уравнений (10.7) и (10.8) равны, тогда будут равны и правые части. В результате взаимодействия и движения тел кинетическая и потенциальная энергии изменяются так, что увеличение одной из них равно уменьшению другой:

$$E_{k_2} - E_{k_1} = -(E_{p_2} - E_{p_1}) \text{ или } E_{k_1} + E_{p_1} = E_{k_2} + E_{p_2}.$$

Это уравнение выражает закон сохранения механической энергии применительно к замкнутой системе тел, в которой не действуют силы трения.

Итак, полная механическая энергия замкнутой системы тел остается неизменной:

$$E = E_k + E_p = \text{const.}$$

В действительности, конечно, потенциальная и кинетическая энергии рано или поздно исчезают. Тогда мы определяем немеханический вид энергии, связанной с внутренней структурой вещества (например, тепловую энергию). Вследствие этого повышается температура тела и окружающей его среды. Таким образом, механическая энергия бесследно не исчезает, а, превратившись в немеханический вид энергии, передается другим телам.

Закон сохранения полной механической энергии является частным случаем всеобщего закона сохранения и превращения энергии: *энергия тела никогда не исчезает и не появляется вновь — она лишь превращается из одного вида в другой.*

Всеобщий закон сохранения и превращения энергии выполняется повсюду. В дальнейшем мы рассмотрим тепловую, ядерную, электро-

магнитную и другие виды энергий. Каждый из них характеризует какие-то особые физические, химические, биологические явления, которые взаимосвязаны друг с другом законом сохранения энергии.

Вопросы для самоконтроля

1. Как проявляется закон сохранения импульса при столкновении тел?
2. При каких условиях справедлив закон сохранения импульса?
- *3. Может ли общий импульс двух тел быть меньше импульса одного из них? Ответ обоснуйте.
4. Как изменится кинетическая энергия тела, если его скорость уменьшится вдвое при постоянной массе? Если его масса увеличится вдвое при неизменной скорости?
5. Что называют *полной механической энергией тела*?
6. В чем смысл закона сохранения и превращения механической энергии?
7. Как изменяются потенциальная и кинетическая энергии мяча, брошенного вертикально вверх, в процессе его полета?
8. С какой энергией (кинетической или потенциальной) совпадает полная механическая энергия свободно падающего тела в момент удара о землю?
9. В каком случае кинетическая энергия тела равна нулю?
- *10. Почему при действии силы трения закон сохранения полной механической энергии нарушается?
- *11. Что происходит с полной механической энергией системы, если на нее действуют внешние силы?

Примеры решения задач

1. Спортсмен массой 60 кг бежит со скоростью 9 м/с и прыгает на движущуюся навстречу ему со скоростью 2 м/с тележку массой 150 кг. В какую сторону и с какой скоростью будет катиться тележка со спортсменом?

Д а н о:

$$m_1 = 60 \text{ кг}$$

$$v_1 = 9 \text{ м/с}$$

$$m_2 = 150 \text{ кг}$$

$$v_2 = 2 \text{ м/с}$$

$$v = ?$$

Решение. Данную систему можно считать замкнутой, так как сила тяжести компенсирует силу реакции опоры (спортсмен и тележка движутся по горизонтальной дороге). Силу трения считаем незначительной и пренебрегаем ею.

Направим координатную ось по направлению движения спортсмена (рис. 50, а).

Из условия задачи известны массы спортсмена m_1 и тележки m_2 , а также их скорости до взаимодействия, соответственно, \vec{v}_1 и \vec{v}_2 .

После взаимодействия они объединились и стали двигаться, как одно тело, со скоростью \vec{v} (рис. 50, б). Их импульсы до взаимодействия: $m_1 \vec{v}_1$, $m_2 \vec{v}_2$ и после взаимодействия: $(m_1 + m_2) \vec{v}$. По закону сохранения импульса, их полный импульс до и после взаимодействия должен быть одинаковым (его нужно написать для проекции на горизонтальную ось).

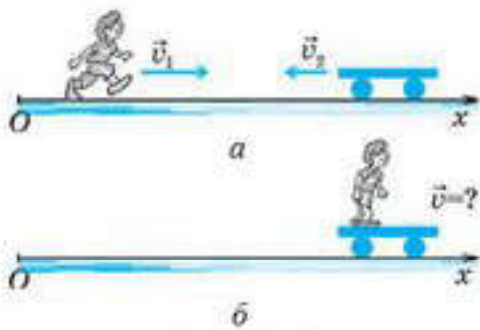


Рис. 10.4

Следовательно:

$$m_1 v_1 - m_2 v_2 = (m_1 + m_2) v.$$

Откуда $v = \frac{m_1 v_1 - m_2 v_2}{m_1 + m_2}$;

$$v = \frac{60 \text{ кг} \cdot 9 \frac{\text{м}}{\text{с}} - 150 \text{ кг} \cdot 2 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{210 \text{ кг}} = 1,14 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Тележка будет катиться в направлении бега спортсмена со скоростью 1,14 м/с (рис. 10.4, б).

Ответ : $1,14 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

2. Из пружинного пистолета стреляют шариком вертикально вверх со скоростью 6 м/с. На какую максимальную высоту поднимется шарик? Массой пружины и сопротивлением воздуха пренебречь.

Д а н о:
 $v = 6 \text{ м/с}$
 $H = ?$

Решение. Когда пистолет подготовлен к выстрелу, он обладает потенциальной энергией. Во время выстрела эта энергия переходит к шариком, и вся энергия превращается в его кинетическую энергию:

$$E_k = \frac{mv^2}{2}.$$

Во время полета шарика, по закону сохранения механической энергии, кинетическая энергия превращается в потенциальную. На наибольшей высоте шарик обладает только потенциальной энергией $E_p = mgh$. По закону сохранения механической энергии, получаем:

$$\frac{mv^2}{2} = mgH_{\text{max}},$$

откуда $H_{\text{max}} = \frac{v^2}{2g}$; $H_{\text{max}} = \frac{(6 \frac{\text{м}}{\text{с}})^2}{2 \cdot 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}} = 1,8 \text{ м}.$

Ответ : 1,8 м.

Упражнение 4

1. Мальчик массой 22 кг, бегущий со скоростью 2,5 м/с, вскакивает сзади на платформу массой 12 кг. Чему равна результирующая скорость платформы с мальчиком?
2. Неподвижная лодка вместе с находящимся в ней охотником имеет массу 200 кг. Какую скорость получит лодка, если охотник выстрелит в горизонтальном направлении? Масса пули 0,01 кг, а ее скорость 800 м/с.
3. Чему равна кинетическая энергия мяча массой 300 г, когда вы бросаете его со скоростью 40 м/с?

4. Сани тянут на пути 100 м с силой 80 Н за веревку, составляющую угол 30° с горизонтом. Какая работа совершается над санями?
5. Определите энергию, которой обладает яблоко массой 250 г, висящее на ветке на высоте 2 м над землей.
6. При какой деформации пружины, жесткость которой 250 Н/м, ее энергия станет 500 Дж?
7. Растянутая пружина жесткостью 100 Н/м действует на прикрепленное к ней тело силой 25 Н. Чему равна потенциальная энергия пружины?
8. На какой высоте находится тело массой 500 г, имеющее скорость 4 м/с, если полная энергия этого тела равна 44 Дж?
9. Стрела массой 20 г выпущена из лука вертикально вверх со скоростью 20 м/с. Определите ее кинетическую энергию на высоте 15 м.
10. Камень массой 0,2 кг бросают вертикально вверх с начальной скоростью 20 м/с. Какова начальная кинетическая энергия камня? Каково значение максимальной высоты подъема?

Что освоили по этой теме?

Насколько полезна и интересна была для вас полученная информация?	Что еще вы хотели бы узнать по данной теме?	Какие вопросы возникли у вас в ходе изучения темы?

§ 11. Кинематика жидкости

» **Ключевые понятия:** уравнение неразрывности, уравнение Бернулли.

» **На этом уроке вы:**

установите законы протекания жидкости, используя законы сохранения.

При кинематическом описании жидкости или газа можно поступить следующим образом. Будем следить за определенной точкой пространства и фиксировать величину и направление скоростей различных частей жидкости, которые в разные моменты времени проходят через эту точку. Если проделать это для точек пространства в определенный момент времени, то получится мгновенная картина распределения скоростей в движущейся жидкости — так называемое *поле скоростей*. *Линии, касательные к которым во всех точках совпадают с направлениями скоростей жидкости в этих точках, называются линиями тока* (рис. 11.1). При стационарном течении жидкости поле скоростей, а, следовательно, и линии тока со временем не меняются. В этом случае линии тока совпадают с траекториями отдельных частиц жидкости, так как каждая частица жидкости возвращается в данную точку с той же самой скоростью.

Часть жидкости, ограниченная линиями тока, называется трубкой тока (рис. 11.2). Такая мысленно выделенная в потоке часть жидкости — трубка тока, подобно жидкости в настоящей трубе, движется, нигде не пересекая боковую поверхность трубки. При стационарном течении количество жидкости, пересекающей в единицу времени сечение S_1 (т. е. втекающей в выделенную часть трубки), равно количеству жидкости, вытекающей через сечение S_2 . Если выбрать трубку тока с поперечным сечением ΔS настолько малым, чтобы скорость жидкости во всех точках сечения была одинаковой, причем это сечение было ориентировано перпендикулярно линиям тока, то количество жидкости Δm , протекающей через это сечение за время t , будет равно

$$\Delta m = \rho v \Delta S t. \quad (11.1)$$

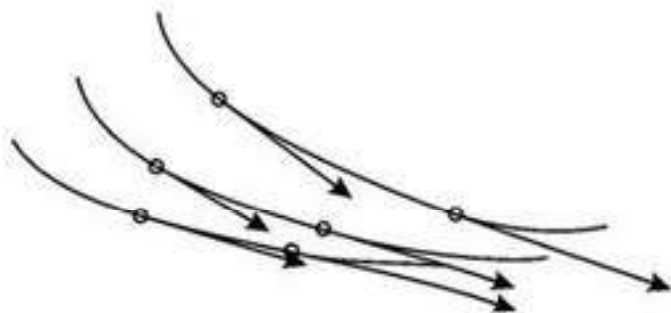


Рис. 11.1

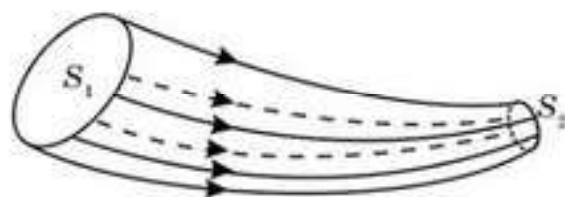


Рис. 11.2

В стационарном потоке величина Δm одна и та же для любого поперечного сечения выбранной трубки тока, поэтому, согласно (11.1):

$$\rho_1 v_1 \Delta S_1 t_1 = \rho_2 v_2 \Delta S_2 t_2. \quad (11.2)$$

Если жидкость можно рассматривать как несжимаемую, то $\rho_1 = \rho_2$ и условия выражения (11.2) принимают вид:

$$v_1 \Delta S_1 = v_2 \Delta S_2 \text{ или } \frac{v_1}{v_2} = \frac{\Delta S_2}{\Delta S_1}. \quad (11.3)$$

Это соотношение называется *уравнением неразрывности*. Полученный результат (11.3) справедлив для выбранной трубки тока.

Динамика движения реальной жидкости очень сложна. Для упрощения ее описания в некоторых случаях силами внутреннего трения можно пренебречь. Такую жидкость называют *идеальной*. При движении идеальной жидкости не происходит превращения механической энергии во внутреннюю, т. е. механическая энергия жидкости сохраняется. Закон сохранения механической энергии для идеальной несжимаемой жидкости выражается *уравнением Бернулли*.

Рассмотрим часть жидкости, заключенной между сечениями ΔS_1 и ΔS_2 некоторой трубки тока, расположенными на высотах h_1 и h_2 , соответственно (рис. 11.3). За промежуток

времени Δt эта жидкость смещается вдоль трубки тока и занимает новое положение между сечениями $\Delta S'_1$ и $\Delta S'_2$. Для малого промежутка времени Δt можно пренебречь различием между площадями ΔS_1 и $\Delta S'_1$ (старых и новых сечений, различием в их высотах).

Подсчитаем работу, совершаемую внешними силами над выделенной жидкостью за время Δt .

Силы давления, действующие на боковую поверхность трубки, работы не совершают, так как действуют перпендикулярно перемещению. Работа силы давления в сечении ΔS_1 равна $\Delta A_1 = F_1 \Delta l_1 = p_1 \Delta S_1 v_1 \Delta t$, работа в сечении ΔS_2 — $\Delta A_2 = F_2 \Delta l_2 = p_2 \Delta S_2 v_2 \Delta t$, так что полная работа внешних сил будет:

$$\Delta A = F_1 l_1 - F_2 l_2, \text{ или } \Delta A = p_1 \Delta S_1 v_1 \Delta t - p_2 \Delta S_2 v_2 \Delta t. \quad (11.4)$$

В силу стационарности движения энергия жидкости между сечениями $\Delta S'_1$ и ΔS_2 не меняется. Эта часть жидкости показана на рисунке 11.3 двойной штриховкой. Поэтому изменение энергии рассматриваемой жидкости равно энергии части жидкости между сечениями ΔS_2 и $\Delta S'_2$ минус энергия части жидкости между сечениями ΔS_1 и $\Delta S'_1$. Потенциальная энергия части жидкости между сечениями ΔS_2 и $\Delta S'_2$ равна $E_{п2} = \Delta m_2 g h_2 = \rho \Delta V_2 g h_2 = \rho \Delta S_2 v_2 \Delta t g h_2$, ее кинетическая энергия —

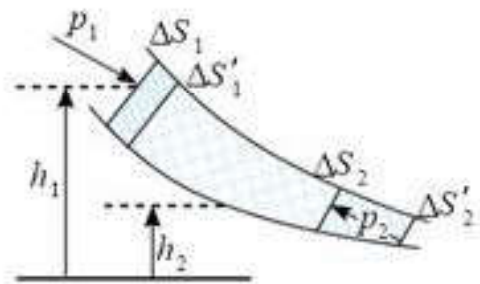


Рис. 11.3

$E_{к2} = \frac{1}{2} \Delta m_2 v_2^2 = \frac{1}{2} \rho \Delta V_2 v_2^2 = \frac{1}{2} \rho \Delta S_2 v_2 \Delta t v_2^2$. Аналогично записываются выражения для энергии жидкости между сечениями ΔS_1 и $\Delta S_1'$. Поэтому изменение энергии всей выделенной части жидкости в рассматриваемой трубке тока за время Δt равно:

$$\Delta E = \rho \Delta S_2 v_2 \Delta t g h_2 + \frac{1}{2} \rho \Delta S_2 v_2 \Delta t v_2^2 - (\rho \Delta S_1 v_1 \Delta t g h_1 + \frac{1}{2} \rho \Delta S_1 v_1 \Delta t v_1^2). \quad (11.5)$$

На основании закона сохранения механической энергии работа внешних сил (11.4) равна изменению энергии системы (11.5). Учитывая уравнение неразрывности (11.3), получим:

$$p_1 + \rho g h_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \rho g h_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2. \quad (11.6)$$

Это и есть **уравнение Бернулли**. Оно было выведено для достаточно узкой трубки тока и, строго говоря, справедливо, когда эта трубка сжимается в линию тока. Поэтому сумма $p + \rho g h + \frac{1}{2} \rho v^2$ остается неизменной вдоль одной и той же линии тока. Уравнение Бернулли еще называют **уравнением трех давлений**, так как p — статическое давление, $\rho g h$ — гидростатическое давление, $\frac{\rho v^2}{2}$ — гидродинамическое давление.

В то же время, слагаемое $\frac{\rho v^2}{2}$ представляет собой плотность кинетической энергии; слагаемое $\rho g h$ — плотность потенциальной энергии; ρ — это плотность потенциальной энергии жидкости, измеряемая работой, которую она произвела бы под действием давления p . Поэтому **уравнение Бернулли называют уравнением трех энергий**.

Разделив уравнение (11.6) на ρg , получим $h + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} = \text{const}$.

Здесь h — **геодезическая** (геометрическая) **высота**, т. е. высота данного сечения над горизонтом; $\frac{p}{\rho g}$ — **пьезометрическая высота**, т. е. высота такого столба жидкости, который своим весом оказывает давление p в данном сечении; $\frac{v^2}{2g}$ — **скоростная** (напорная) **высота**, т. е. высота, на которую поднимется в вакууме частица жидкости с начальной скоростью v , двигаясь вертикально вверх. Поэтому **уравнение Бернулли называют еще уравнением трех высот**.

С помощью уравнения Бернулли легко оценить скорость истечения жидкости v из шприца. Будем считать жидкость идеальной. Пусть на поршень шприца, который имеет площадь S_0 , действует внешняя сила \vec{F} (рис. 11.4), и струя жидкости вытекает из иглы с отверстием площадью S . Рассмотрим линию тока, проходящую вдоль оси симметрии



Рис. 11.4

шприца, и применим к ней уравнение Бернулли. Обозначая скорость поршня v_0 , следовательно, жидкости вблизи него через v_0 , имеем:

$$\frac{F}{S_0} + \frac{1}{2}\rho v_0^2 = \frac{1}{2}\rho v^2. \quad (11.7)$$

Из уравнения неразрывности (11.3) следует, что $S_0 v_0 = Sv$. Находим отсюда v_0 и, подставляя ее значение в формулу (11.7), имеем:

$$\frac{F}{S_0} + \frac{1}{2}\rho\left(\frac{S}{S_0}\right)^2 v^2 = \frac{1}{2}\rho v^2 \text{ или } \frac{F}{S_0} = \frac{1}{2}\rho v^2 \left[1 - \left(\frac{S}{S_0}\right)^2\right]. \quad (11.8)$$

Обычно площадь отверстия иглы во много раз меньше площади поршня шприца: $S \ll S_0$. Тогда, пренебрегая квадратом отношения $\frac{S}{S_0}$ по сравнению с единицей, найдем скорость истечения: $v = \sqrt{\frac{2F}{\rho S_0}}$.

Как вытекает налитая в широкий сосуд жидкость из небольшого отверстия на дне или в боковой стенке под действием силы тяжести (рис. 11.5)?

Скорость истечения идеальной несжимаемой жидкости легко найти с помощью уравнения Бернулли. Рассмотрим линию тока, начинающуюся вблизи свободной поверхности жидкости и проходящую вдоль оси отверстия. Поскольку скорость жидкости вблизи поверхности в широком сосуде пренебрежимо мала, то уравнение Бернулли имеет вид:

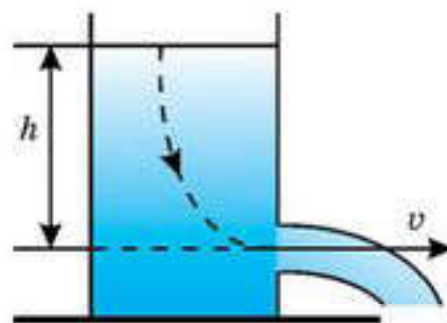


Рис. 11.5

$$\rho gh = \frac{1}{2}\rho v^2,$$

откуда

$$v = \sqrt{2gh}. \quad (11.9)$$

Таким образом, *скорость истечения идеальной жидкости из отверстия в сосуде такая же, как и при свободном падении тела с высоты h* . Этот факт впервые был установлен Эванджелиста Торричелли (1608—1647) — итальянским физиком и математиком, учеником Г. Галилея (формула Торричелли).

Вопросы для самоконтроля

1. Что называют линиями тока?
2. Что называется трубкой тока?
3. В чем физический смысл уравнения неразрывности?
4. Какую жидкость называют идеальной?
5. Какое давление называется гидростатическим, а какое — гидродинамическим?
- *6. В чем физический смысл уравнения Бернулли?
7. Как рассчитать скорость истечения жидкости из шприца?
8. Что следует из формулы Торричелли?

Что освоили по этой теме?

Насколько полезна и интересна была для вас полученная информация?

Что еще вы хотели бы узнать по данной теме?

Какие вопросы возникли у вас в ходе изучения темы?

§ 12. Вязкая жидкость

Ключевые понятия: вязкая жидкость, коэффициент вязкости, ламинарное и турбулентное течение.

На этом уроке вы:

познакомитесь с понятием вязкой жидкости, ламинарным и турбулентным течениями.

Вязкая жидкость. Для того чтобы ввести количественную характеристику вязкости жидкости, рассмотрим следующий опыт. Пусть жидкость находится между двумя твердыми плоскими параллельными пластинами (рис. 12.1). Нижняя пластина неподвижна, а верхняя движется параллельно нижней с малой скоростью v . Опыт показывает, что для поддержания равномерного движения верхней пластины необходима сила F , направленная вдоль пластины и пропорциональная расстоянию d между пластинами:

$$F = \eta \frac{Sv}{d}. \quad (12.1)$$

Благодаря “прилипанию” жидкости к поверхности пластины эта сила характеризует внутреннее трение, т.е. трение между проскальзывающими относительно друг друга слоями жидкости, а не между жидкостью и твердым телом. Величина η в формуле (12.1) описывает вязкие свойства жидкости и называется *коэффициентом вязкости*. Единица измерения коэффициента вязкости: $1 \text{ пуаз} = 1 \text{ Па} \cdot \text{с}$.

Вязкость жидкости сильно зависит от ее температуры. Так, например, вязкость воды при повышении ее температуры от 0 до 20°C уменьшается почти вдвое.

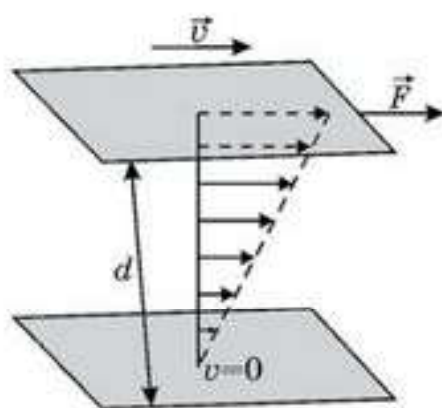


Рис. 12.1

При наличии вязкости, т.е. сил внутреннего трения, тормозящих движение жидкости, для поддержания стационарного течения в горизонтальной трубе неизменного сечения необходимо поддерживать постоянную разность давлений на концах трубы. В идеальной жидкости при таком движении давление, как это следует из уравнения Бернулли, одинаково вдоль всей трубы.

Течение жидкости в цилиндрической трубе, при котором скорости частиц жидкости

всюду направлены вдоль оси трубы, называется **ламинарным**. Такое течение возможно только при не очень большой скорости потока вязкой жидкости в трубах малого поперечного сечения. С увеличением скорости или площади сечения трубы характер течения принципиально изменяется. Вместо ламинарного течения возникает носящее нерегулярный характер **завихренное**, или **турбулентное**, течение. Но средняя скорость в данном месте трубы будет постоянна и направлена вдоль оси трубы. На рисунке 12.2, *а* показано распределение скорости жидкости по сечению трубы при ламинарном течении, а на рисунке 12.2, *б* — распределение средней скорости при установившемся турбулентном течении. В турбулентном потоке, как видно из рисунка, можно четко выделить пограничный слой жидкости вблизи стенок трубы, где средняя скорость быстро падает до нуля, в то время как при ламинарном течении такого четкого пограничного слоя нет, так как скорость изменяется за счет вязкости по всему сечению трубы. Другими словами, в этом случае труба находится в пределах пограничного слоя.

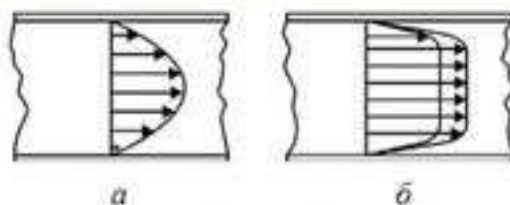


Рис. 12.2

Вопросы для самоконтроля

1. В чем физический смысл коэффициента вязкости?
2. Какое движение жидкости называется *ламинарным*?
3. Какое движение жидкости называется *турбулентным*?
4. Как влияет температура на вязкость жидкости?

Пример решения задачи

Найдите скорость течения углекислого газа по трубе, если известно, что за время $t = 30$ мин через поперечное сечение трубы протекает масса газа $m = 0,51$ кг. Плотность газа $\rho = 7,5$ кг/м³; диаметр трубы $D = 2$ см.



Рис. 12.3

Д а н о:

$$t = 30 \text{ мин} = 1800 \text{ с}$$

$$m = 0,51 \text{ кг}$$

$$\rho = 7,5 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$D = 2 \text{ см} = 0,02 \text{ м}$$

v — ?

Решение. За время t через трубу цилиндрической формы диаметром D (рис. 12.3) проходит некоторый объем углекислого газа. Масса этого объема нам известна, тогда мы можем записать:

$$V = \pi \frac{D^2}{4} L = \frac{m}{\rho}. \quad (12.2)$$

Скорость течения углекислого газа $v = \frac{L}{t}$. Из уравнения (12.2) найдем

$$L = \frac{4m}{\pi D^2 \rho}, \text{ тогда } v = \frac{4m}{\pi D^2 \rho t};$$

$$v = \frac{4 \cdot 0,51 \text{ кг}}{3,14 \cdot (0,02 \text{ м})^2 \cdot 7,5 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 1800 \text{ с}} \approx 0,12 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

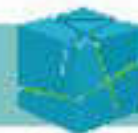
Ответ : 0,12 м/с.

Упражнение 5

1. Нарисуйте и объясните своими словами, что происходит, когда ложку подставляют выпуклой стороной под струю воды.
2. Объясните, почему завихрение дольше сохраняется в воде, чем в воздухе.
3. Почему наружная поверхность автомобиля остается пыльной даже после движения с высокой скоростью?
4. Если между двумя листами бумаги продувать воздух, то они притянутся друг к другу. Почему?
5. По какой причине во время бурь, когда скорость ветра достигает значительной величины, иногда срывает крыши с построек?

Что освоили по этой теме?

Насколько полезна и интересна была для вас полученная информация?	Что еще вы хотели бы узнать по данной теме?	Какие вопросы возникли у вас в ходе изучения темы?



Раздел I. МЕХАНИКА

<p><i>Механическое движение</i> — это изменение положения тела относительно других тел с течением времени</p>	
<p><i>Перемещение</i> — направленный отрезок прямой, проведенный из начального положения движущегося точечного тела в его последующее положение</p>	\vec{s}
<p><i>Средняя скорость неравномерного прямолинейного движения</i> — физическая величина, равная отношению перемещения тела ко времени t, за которое оно совершено</p>	$\vec{v}_{\text{ср}} = \frac{\vec{s}}{\Delta t}$
<p><i>Равноускоренное прямолинейное движение</i></p>	$\vec{a} = \text{const}$
<p>Ускорение</p>	$\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}$
<p>Скорость</p>	$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t$ $v_x = v_{0x} + a_x t$
<p>Перемещение</p>	$\vec{s} = \vec{v}_0 t + \frac{\vec{a}t^2}{2}$ $s_x = v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}$
<p>Координата</p>	$x = x_0 + v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}$
<p><i>Центростремительное ускорение</i> — ускорение, необходимое для получения кругового движения, и оно всегда направлено по радиусу к центру окружности</p>	$a_{\text{цс}} = \frac{v^2}{r}$
<p><i>Первый закон Ньютона</i> : существуют такие системы отсчета, относительно которых тело сохраняет свою скорость постоянной, если на него не действуют другие тела или действия других тел компенсируются</p>	

Продолжение

<p><i>Второй закон Ньютона</i> : ускорение, которое возникает у тела, прямо пропорционально действующей на него силе и обратно пропорционально массе тела</p>	$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$
<p><i>Третий закон Ньютона</i> : тела действуют друг на друга с силами, равными по модулю и направленными в противоположные стороны</p>	$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$
<p><i>Закон всемирного тяготения</i>: сила всемирного тяготения прямо пропорциональна произведению масс взаимодействующих тел и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними</p>	$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$
<p><i>Импульс тела</i> — физическая величина, равная произведению массы тела на его скорость</p>	$\vec{p} = m\vec{v}$
<p><i>Закон сохранения импульса</i> : векторная сумма импульсов тел, составляющих замкнутую систему, остается постоянной при любых взаимодействиях этих тел между собой</p>	$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \vec{p}'_1 + \vec{p}'_2$
<p><i>Механическая работа</i> равна произведению модулей силы и перемещения на косинус угла α между этими векторами</p>	$A = F \cdot s \cdot \cos \alpha$
<p><i>Полная механическая энергия</i> замкнутой консервативной системы тел остается неизменной</p>	$E = E_k + E_p = \text{const}$

§ 13. Основные положения молекулярно-кинетической теории газов

Ключевые понятия: микрочастицы, атом, молекула, давление газа, диффузия, броуновское движение.

На этом уроке вы:

познакомитесь с основными положениями молекулярно-кинетической теории и опытами, подтверждающими их.

Как уже было сказано выше, *молекулярно-кинетическая теория строения вещества* была создана М. В. Ломоносовым на основе обобщения многочисленных наблюдений и экспериментов. Перечислим ее основные положения.

1. Все тела состоят из микрочастиц (атомов или молекул), причем масса тела равна сумме масс микрочастиц, из которых оно состоит:

$$m = m_0 N.$$

2. Микрочастицы в теле непрерывно и хаотично движутся, причем скорость этого движения связана с температурой тела, поэтому его называют *тепловым движением*. Количественно связь скорости движения молекул с температурой тела установил австрийский физик Людвиг

Больцман (1844—1906): $v_0 = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}$, где m_0 — масса молекулы;

T — абсолютная температура тела; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — *постоянная Больцмана*.

3. Микрочастицы в теле взаимодействуют друг с другом, причем силы взаимодействия носят электромагнитный характер. Между частицами тела одновременно действуют и силы отталкивания, и силы притяжения.

Приведем опытные факты, которые подтверждают основные положения молекулярно-кинетической теории.

1. *Делимость вещества*. При этом физические и химические свойства вещества не изменяются.

2. *Сжимаемость газов*. Это свидетельствует о наличии больших расстояний между молекулами тела.

3. *Свойство газа занимать любой объем*. Этот факт говорит как о движении молекул, так и о наличии расстояний между ними, которые легко меняются.

4. *Закон кратных отношений*. Согласно этому закону, при образовании любых химических соединений массы реагирующих веществ

находятся в определенных отношениях. Это доказывает, хотя и косвенно, что тела должны состоять из атомов.

5. *Давление газа на стенки сосуда*, в котором он находится. Это говорит о движении молекул.

6. *Диффузия* — проникновение молекул одного вещества в межмолекулярное пространство другого. Диффузию можно наблюдать и в газах (запахи одеколона, бензина и т. д. в воздухе), и в жидкостях (растекание краски, чернил, туши, молока в воде), и в твердых телах (свинцовый и золотой цилиндры были плотно прижаты друг к другу в течение длительного времени, при этом произошло взаимное проникновение молекул золота в межмолекулярное пространство свинца, и наоборот). Скорость протекания диффузии зависит от температуры тела и фазового состояния вещества: в газах она протекает значительно быстрее, чем в жидкостях и твердых телах.

7. Наблюдение молекул в электронный микроскоп или ионный проектор (прибор, дающий увеличение в несколько миллионов раз). В настоящее время можно увидеть изображения атомов с помощью сложных туннельных микроскопов, обеспечивающих увеличение в 100 млн. раз.

8. Опыт с маслом, помещенным в стальной цилиндр: заключенное в стальной цилиндр масло при большом давлении просачивалось сквозь стенки цилиндра, а сам цилиндр оставался при этом целым. Это говорит о том, что между молекулами стали есть промежутки, т. е. *тело не сплошное*.

9. Слипание двух свинцовых цилиндров, предварительно обработанных специальным ножом, чтобы убрать крупные шероховатости поверхности и сравнять их (в идеале) с размерами атомов. В этом случае цилиндры становятся как бы единым целым. Если теперь, предварительно закрепив один цилиндр, подвесить тяжелый груз ко второму, то цилиндры не оторвутся друг от друга. Они, сцепившись, могут удержать довольно тяжелый груз (порядка 20 кг). После проведения опыта свинцовые цилиндры легко разъединяются.

10. Прочность тел доказывает, что микрочастицы в теле притягиваются друг к другу. Обыкновенную палку трудно сломать, так как между молекулами существуют силы притяжения.

11. Способность тел к упругим деформациям тоже говорит о наличии сил взаимодействия (как сил притяжения, так и сил отталкивания) между микрочастицами тела.

12. *Броуновское движение* — это беспорядочное непрерывное движение мельчайших, взвешенных в жидкости или газе частиц какого-либо твердого тела под ударами молекул жидкости или газа. Это движение является ярким доказательством хаотичного движения молекул в теле. Впервые это движение в 1827 г. наблюдал английский ботаник Роберт Броун (1773—1858). Рассматривая под микроскопом споры плауна, попавшие в воду, он заметил, что они совершают хаотичное

движение (рис. 13.1). Ученый обратил внимание на то, что это движение не прекращается и происходит непрерывно; его можно наблюдать сутками, месяцами, и интенсивность его менялась только при изменении температуры.

Броуновское движение — это тепловое движение, и оно не может прекратиться, так как связано с температурой тела.

Немецкий физик Р. Поль, описывая броуновское движение, говорил о том, что, наблюдая за движением частиц, мы как бы приоткрываем занавес закулисного мира природы. Какую же картину мы увидим? Безостановочную сутолоку огромного числа частиц, летящих с разными скоростями. Мельчайшие частицы, движущиеся с огромными скоростями, почти мгновенно изменяют направление своего движения, а более крупные — продвигаются гораздо медленнее, но и они постоянно изменяют направление своего движения. Большие же частицы практически “топчутся” на месте. Мелкие частицы испытывают огромное количество столкновений, после которых разлетаются в разные стороны. Правление “господина слепого случая” — вот наиболее сильное впечатление, которое производит на наблюдателя эта картина.

Объяснить броуновское движение можно только на основе молекулярно-кинетической теории. Причина броуновского движения состоит в том, что удары молекул о броуновскую частицу не компенсируют друг друга. Качественно броуновское движение можно объяснить так: *когда с частицей сталкивается большое число молекул, обладающих малым импульсом, но двигающихся случайно в одном направлении, то они могут вызвать заметное смещение этой частицы.* Количественную теорию броуновского движения создали Альберт Эйнштейн (1879—1955) и польский физик-теоретик Марциан Смолуховский (1872—1917) в 1905—1906 гг. Работы французского физика Жана Перрена (1870—1942) окончательно доказали верность молекулярно-кинетической теории.

13. Опыт немецкого физика Отто Штерна (1888—1969) по определению скорости молекул был проведен в 1920 г. Экспериментальная установка, помещенная в непрерывно откачиваемый вакуумный сосуд, состояла из двух коаксиальных цилиндров *A* и *B* (рис. 13.2, *a*), скрепленных между собой. По оси цилиндров протянута тонкая платиновая

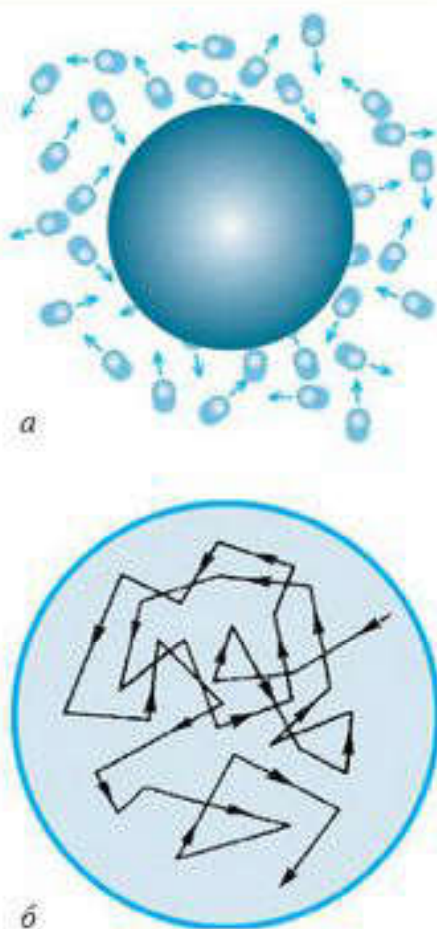


Рис. 13.1

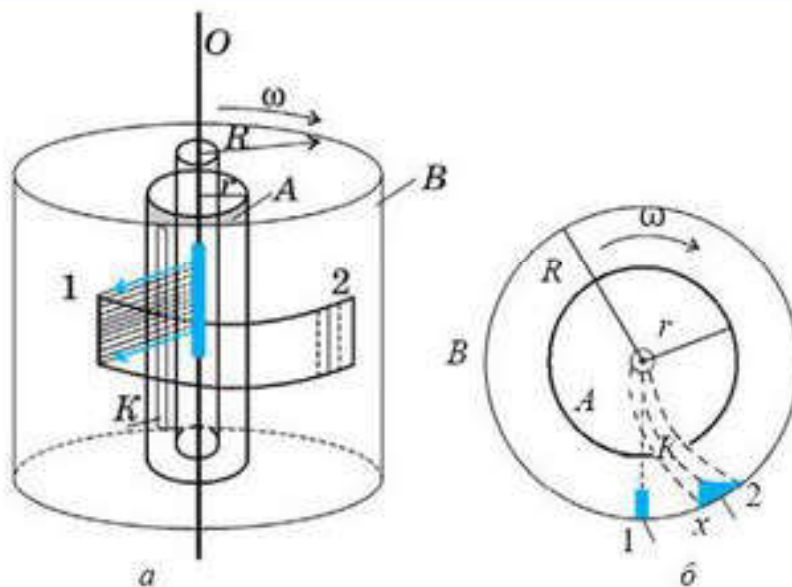


Рис. 13.2

проволока O , покрытая слоем серебра. При пропускании электрического тока проволока нагревается, и серебро начинает испаряться. Испарившиеся молекулы летят прямолинейно, и некоторая их часть, пролетев сквозь щель K во внутреннем цилиндре, оседает на охлаждаемой поверхности внешнего цилиндра, образуя на ней четкую полоску 1 металлического серебра. Если цилиндры привести во вращение с постоянной угловой скоростью ω , то полоска осажденных атомов оказывается смещенной от прежнего положения на некоторое расстояние 2 и заметно размытой (рис. 13.2, б). Смещение вызвано тем, что за время полета атома серебра от внутреннего цилиндра к внешнему вся система успевает повернуться на некоторый угол ϕ . По величине смещения полоски судят о величине скорости атомов серебра. Время полета атомов между цилиндрами

$$T = \frac{R_B - R_A}{v_0} \text{ равно времени поворота системы цилиндров } T = \frac{x}{\omega R_B}.$$

Отсюда имеем:
$$v_0 = \frac{(R_B - R_A)\omega R_B}{x}.$$

Штерн получил, что скорости молекул серебра в условиях опыта составляли порядка 650 м/с. Меняя силу тока в проводнике, ученый изменял температуру и показал, что скорость атомов пропорциональна \sqrt{T} . Размытость полоски объясняется тем, что атомы серебра имеют разные скорости, и поэтому самые быстрые атомы достигают стенок внешнего цилиндра раньше, а самые медленные — позже. По толщине слоя

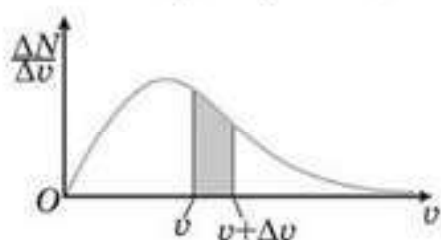


Рис. 13.3

судят о числе атомов, обладающих данной скоростью. Опыт показал, что действительно существует распределение молекул по скоростям. Характер такого распределения был теоретически рассчитан Максвеллом еще в 1859 г. (рис. 13.3), а опыт Штерна его полностью подтвердил. Опыт Штерна также

обосновал справедливость формулы средней квадратичной скорости молекул:

$$\bar{v}_0 = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}.$$

Недостаток опыта состоял в том, что Штерн рассматривал молекулярный пучок. В дальнейшем его опыт улучшили и получили более точные результаты.

Мы с вами рассмотрели только некоторые факты, полученные в ходе опытов и подтверждающие основные положения молекулярно-кинетической теории. Сами же положения молекулярно-кинетической теории очень важны как для описания тепловых процессов, происходящих с телами (нагрев, охлаждение, фазовые переходы), так и при создании теории теплопроводности тел.

Строение газообразных, жидких и твердых тел. Попробуем объяснить тот факт, что вещество может находиться в трех агрегатных состояниях, используя молекулярно-кинетическую теорию строения вещества.

Газы. В газах расстояния между молекулами огромны и во много раз превышают размеры молекул. Потенциальная энергия взаимодействия молекул очень мала — во много раз меньше их кинетической энергии. Поэтому молекулы в газах легко перемещаются по всему объему. Сталкиваясь друг с другом, они постоянно изменяют направление своего перемещения. В газах царит и ближний, и дальний беспорядок, т. е. полный хаос. Сталкиваясь со стенками сосуда, в котором находится газ, молекулы передают им свой импульс. Возникает давление газа на стенки сосуда.

Газ не сохраняет ни объема, ни формы, так как слабые силы взаимодействия не в состоянии удерживать молекулы друг возле друга.

Жидкости. Молекулы жидкости расположены вплотную друг к другу. Они как бы зажаты молекулами-соседями. Сталкиваясь с ними, молекула совершает колебательное движение около положения равновесия. Тепловая энергия молекул в жидкости соизмерима с минимальной потенциальной энергией, которую обуславливают силы взаимодействия. Тепловое движение молекул расстраивает это расположение молекул. Рентгеноструктурный анализ показал, что молекулы в жидкости располагаются группами по 10 — 12 штук. Силы взаимодействия между молекулами способны удерживать рядом друг с другом определенное количество молекул, обеспечивая *ближний порядок*. Изредка молекула может совершать “перескоки” из своей группы в другую, попав в которую, она будет продолжать совершать колебательное движение. Из-за “перескоков” молекул в жидкой фазе присутствует *дальний беспорядок*. С повышением температуры возрастает число “перескоков” молекул и уменьшается время их “оседлой жизни”. Про молекулы жидкости можно сказать, что они “ведут полукочевой образ жизни”.

Молекулярное движение в жидкости было изучено советским физиком-теоретиком Яковом Ильичом Френкелем (1894—1952).

Так как молекулы жидкости плотно упакованы, то жидкости практически несжимаемы и поэтому хорошо передают давление. Все жидкости текучи, т. е. они не сохраняют форму, зато сохраняют объем. Кинетическая энергия молекул жидкости соизмерима с их потенциальной энергией.

Съемки с частотой 10 млн. кадров в секунду установили, что жидкость обладает хрупкостью, т. е. при падении на твердую поверхность капля жидкости раскалывается на осколки, которые сразу же собираются в более крупные капли.

Твердые тела. Силы взаимодействия между молекулами твердого тела так велики, что молекулы могут только колебаться около определенных положений, которые называются узлами кристаллической решетки. Поэтому твердые тела сохраняют и форму, и объем. Про молекулы твердого тела говорят, что они образуют ближний и дальний порядки. **Кристаллические решетки разных твердых тел различны, так как различны силы взаимодействия между молекулами и различно расположение самих молекул или атомов в телах.**

Можно отметить следующие типы кристаллических решеток.

1. **Ионные**, в узлах которых находятся положительные и отрицательные ионы.

2. **Атомные**, содержащие в узлах нейтральные атомы.

3. **Молекулярные**, в узлах которых находятся молекулы.

4. **Металлические** — в их узлах содержатся положительные ионы.

Если кристаллу не мешать расти, то внутренний порядок расположения атомов приводит к правильным геометрическим формам — образуются **монокристаллы**.

В твердых телах кинетическая энергия молекул гораздо меньше их потенциальной энергии.

Вопросы для самоконтроля

1. Как вы понимаете утверждение о хаотичности теплового движения?
2. Какие основные положения молекулярно-кинетической теории вы знаете?
3. Какие примеры подтверждают сам факт существования молекул?
4. Как доказать, что молекулы в теле находятся в непрерывном хаотичном движении?
5. Какое движение называется броуновским?
6. От каких факторов зависит интенсивность броуновского движения?
7. Что вы понимаете под *диффузией*? Как можно изменить характер ее протекания?
- *8. Почему опыт Штерна по определению скорости молекул имеет такое важное значение?
9. Как можно доказать, что атомы и молекулы в теле взаимодействуют?
10. Дайте характеристику газообразного состояния вещества с точки зрения молекулярно-кинетической теории.
11. Расскажите о поведении молекул в жидкости.
12. Дайте характеристику твердой фазы вещества.

Примеры решения задач

1. Найдите массу молекулы кислорода O_2 .

Дано:

$$M_r = 16 \cdot 2 = 32$$

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

$$m_{O_2} = ?$$

Решение. Относительная молекулярная масса кислорода равна $M_r = 16 \cdot 2 = 32$. Молярная масса кислорода $M = 32 \cdot 10^{-3}$ кг/моль. Следовательно, масса молекулы кислорода:

$$m_{O_2} = \frac{M}{N_A}; \quad m_{O_2} = \frac{32 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}}{6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}} = 5,3 \cdot 10^{-26} \text{ кг.}$$

Ответ: $5,3 \cdot 10^{-26}$ кг.

2. Определите число молекул, содержащихся в стакане воды.

Дано:



$$m = 200 \text{ г} = 0,2 \text{ кг}$$

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

$$N = ?$$

Решение. Определим число молекул воды в стакане:

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

Относительная молекулярная масса воды $M_r = 12 + 6 = 18$.

Молярная массы воды $M = M_r \cdot 10^{-3} = 18 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

$$\text{Следовательно, } N = \frac{6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1} \cdot 0,2 \text{ кг}}{18 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}} \approx 6,7 \cdot 10^{24}.$$

Ответ: $6,7 \cdot 10^{24}$.

Упражнение 6

- Углерод образует с кислородом два соединения: окись углерода, в которой на три весовые части углерода приходится четыре весовые части кислорода, и двуокись углерода, в которой на три весовые части углерода приходится восемь весовых частей кислорода. Как объяснить эти соотношения на основании атомно-молекулярного учения?
- Как объяснить, почему при соединении литра кислорода с углеродом при том же давлении и температуре образуется 1 литр углекислого газа?

Что освоили по этой теме?

Насколько полезна и интересна была для вас полученная информация?

Что еще вы хотели бы узнать по данной теме?

Какие вопросы возникли у вас в ходе изучения темы?

§ 14. Термодинамические параметры

Ключевые понятия: макротела, микротела, термодинамическая система, термодинамические параметры, термодинамический процесс, давление газа, равновесное состояние, неравновесное состояние.

На этом уроке вы:

познакомитесь с основными понятиями, характеризующими свойства макроскопических тел; научитесь различать равновесное и неравновесное состояния термодинамических систем и описывать эти состояния.

Основные понятия термодинамики вводились не с помощью представлений о внутренней структуре изучаемой системы, а на основе эксперимента. В термодинамике оперируют только макроскопическими величинами: температурой, объемом, давлением, внутренней энергией тела и т. д.

Одним из основных понятий термодинамики является понятие *термодинамическая система*, под которой понимают совокупность тел любого химического состава и любой физической природы, характеризующую определенным числом макроскопических параметров. Если термодинамическая система переходит из одного состояния (с одним набором параметров) в другое, то говорят, что произошел *термодинамический процесс*, т. е. *всякое изменение состояния термодинамической системы и есть термодинамический процесс, который сопровождается изменением термодинамических параметров*.

Под термодинамическими параметрами понимают физические величины, которые характеризуют свойства макроскопических тел (макросистемы) в целом. К ним относятся: давление газа, объем, температура.

Все макротела состоят из *микротел* (атомов и молекул). Микротела тоже имеют свои характеристики (*микروпараметры*). К ним относятся: *объем V_0 молекулы (атома), масса m_0 молекулы (атома), скорость v_0 молекулы (атома), концентрация n молекул (атомов)*. Понятно, что процессы, происходящие с макротелами, обусловлены изменением параметров микротел, из которых данное макротело состоит.

Напомним, что *каждая физическая величина несет определенную информацию, т. е. имеет физический смысл*. Так, например, *масса макротела* показывает нам, какое количество вещества содержится в данном теле, *объем* — какое место в пространстве занимает тело, *давление газа* характеризуется силой, с которой он действует на единицу площади.

Всякая система может находиться в различных состояниях, отличающихся температурой, давлением, объемом и т. д. Когда термодинамические параметры (термопараметры) макротела (макросистемы) не изменяются, то говорят об определенном состоянии этого тела. При

переходе тела из одного состояния в другое его термopараметры изменяются.

Представим себе, что у нас имеется система тел, где в разных точках параметры состояния или хотя бы один из них, например, температура, имеют различные значения. В этом случае мы не можем приписать всей системе какую-то определенную температуру. Состояние такой системы называют *неравновесным*. Если такую систему изолировать и предоставить самой себе, то произойдет процесс выравнивания температуры, после чего процесс теплообмена прекратится — наступит термодинамическое равновесие. *Равновесным* называется такое состояние, при котором параметры системы имеют определенные значения, одинаковые для всех ее частей.

Процесс перехода макросистемы из неравновесного состояния в равновесное называется *релаксацией*, а промежуток времени, требующийся для такого перехода, — *временем релаксации*. Для различных процессов время релаксации может принимать значения от долей секунды (установление равновесного давления в газе) до нескольких лет (выравнивание концентрации в твердых сплавах).

Вопросы для самоконтроля

1. Что понимают под *термодинамической системой*? Какими параметрами она характеризуется?
2. Что называется *термодинамическим процессом*?
3. Что понимают под *термодинамическими параметрами*? Что к ним относится?
4. Какое состояние системы называют *равновесным*? Какие значения имеют при этом параметры системы?
5. Какое состояние системы называют *неравновесным*? Какие значения имеют при этом параметры системы?
6. Что называется *релаксацией*?
- *7. Что является предметом рассмотрения молекулярно-кинетической теории?

Что освоили по этой теме?

Насколько полезна и интересна была для вас полученная информация?	Что еще вы хотели бы узнать по данной теме?	Какие вопросы возникли у вас в ходе изучения темы?

§ 15. Кристаллические и некристаллические вещества

Ключевые понятия: аморфные тела, кристаллы, монокристаллы, анизотропия кристаллов, виды кристаллических структур.

На этом уроке вы:

познакомитесь с кристаллическими и аморфными телами и их свойствами; научитесь различать структуры кристаллических и аморфных тел на примере различных твердых тел; описывать влияние дефектов решетки в кристаллах на свойства твердых тел.

Сходства и отличия. В физике твердыми обычно называют кристаллические тела. Но существуют твердые тела, которые во многих отношениях оказываются ближе к жидкостям, чем к кристаллам. Такие тела называют **аморфными**. Аморфные тела, хотя и могут быть твердыми в обыденном смысле, рассматриваются как очень вязкие жидкости. Они не имеют определенной температуры плавления, при нагревании они постепенно размягчаются, вязкость их уменьшается. Кристаллические тела имеют определенную температуру плавления, неизменную при постоянном давлении. Свойства аморфных тел одинаковы по всем направлениям: *аморфные тела изотропны*. Свойства кристаллов неодинаковы по различным направлениям: *кристаллы анизотропны*. Скорость распространения света, коэффициенты теплопроводности, модуль упругости и многие другие физические свойства кристалла зависят от их направления в нем.

Аморфные тела. В отличие от кристаллических тел, которые характеризуются дальним порядком, т. е. правильной повторяемостью расположения атомов на больших расстояниях, аморфные тела, подобно жидкостям, обладают лишь ближним порядком. Некоторые вещества могут находиться и в кристаллическом, и в аморфном состояниях. Пример такого вещества — двуокись кремния SiO_2 . Кристаллы SiO_2 — это кварц, имеющий правильную кристаллическую структуру (рис. 15.1, а). Структура аморфного кварцевого стекла состоит из тех же элементов, т. е. имеет тот же ближний порядок, но эти элементы соединены между собой по-разному, и дальний порядок отсутствует (рис. 15.1, б).

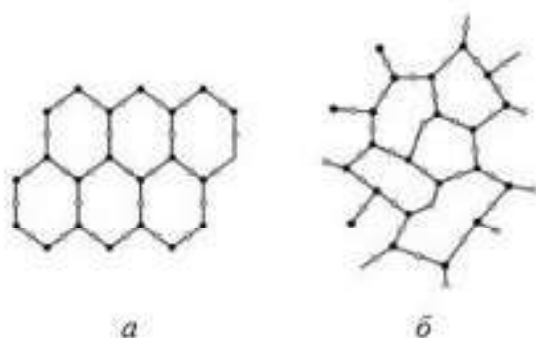


Рис. 15.1

Особенно сильно отличаются кристаллические и аморфные тела по своим тепловым свойствам. Кристаллические тела обладают вполне определенной температурой плавления, а аморфные тела ее не имеют. При нагревании аморфное тело постепенно размягчается, его молекулы все легче и легче меняют “своих ближайших соседей”, вязкость его уменьшается,

и при достаточно высокой температуре оно может вести себя как маловязкая жидкость. Следовательно, *твердые аморфные тела можно рассматривать как очень вязкие жидкости. Они полностью изотропны.*

Многие вещества могут быть переведены из аморфного состояния в кристаллическое, и наоборот. Так, обычное аморфное стекло после выдержки при определенной температуре “расстекловывается” — превращается в мелкие кристаллики и становится мутным, непрозрачным.

Аморфные тела можно подвергать *закалке*. Если аморфное вещество нагреть до достаточно высокой температуры, при которой установится некоторое определенное расположение молекул, а затем быстро его охладить, то расположение молекул, существовавшее перед охлаждением, сохраняется. Такое состояние будет неравновесным, переход в равновесное состояние для таких аморфных веществ обычно происходит весьма медленно и практически не достигается. Поэтому состояние, полученное после закалки, может сохраняться долгое время. Объем тела при высоких температурах больший, чем при низких. При быстрой закалке поверхностный слой охлаждается раньше внутренней части, которая сжимается. Между уже затвердевшей оболочкой и внутренней частью создается сильное напряжение, которое может привести к разрушению тела. Наличие внутреннего напряжения создает *анизотропию*, что хорошо наблюдается оптическими методами. Такое напряжение можно уничтожить новым нагреванием и последующим очень медленным охлаждением. Так, при изготовлении оптических линз больших размеров для астрономических инструментов процесс охлаждения стеклянной заготовки длится несколько месяцев.

Кристаллы. Обычно вещество называют твердым, если оно сохраняет свою форму и свой объем. Однако это — лишь внешние признаки, характеризующие твердое состояние вещества. С физической точки зрения наличие этих признаков не дает возможности четко разграничить твердое и жидкое состояния вещества.

При изучении твердых веществ было обнаружено, что многие твердые тела в природе имеют гладкие плоские поверхности, расположенные под определенными углами, а иногда и форму правильных многогранников. Такие твердые тела называют *монокристаллами* (от греч. *моно* — “один”). Чаще всего они имеют очень маленькие размеры, хотя, например, монокристаллы горного хрусталя иногда бывают размером с человеческий рост.

Изучение внутреннего строения кристаллов с помощью рентгеновского излучения позволило установить, что частицы в кристаллах (молекулы, атомы, ионы) имеют правильное расположение, т. е. образуют *кристаллическую (пространственную) решетку*. Точки в кристаллической решетке, соответствующие наиболее устойчивому положению равновесия частиц твердого тела, называются *узлами решетки*.

Узлы решетки имеют правильное расположение, которое периодически повторяется внутри кристалла. Это означает, что, если на какой-либо прямой расстояние между ближайшими узлами равно a (рис. 15.2), то на расстоянии na от первого узла на этой прямой в кристаллической решетке будет находиться такой же n -й узел. Расположение узлов в кристаллической решетке повторяется вдоль любой прямой (I—IV на рис. 15.2). Правильное расположение частиц в узлах решетки кристалла называют **дальним порядком** в расположении частиц.

Итак, в физике под **твердыми телами** подразумевают только такие вещества, у которых имеется кристаллическое строение. Иначе говоря, у твердого тела обязательно должен быть дальний порядок в расположении его частиц.

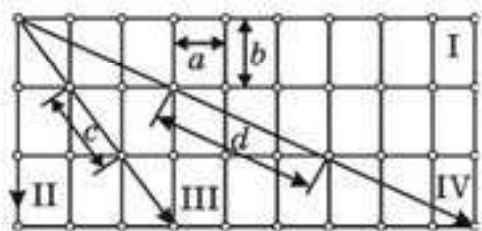


Рис. 15.2

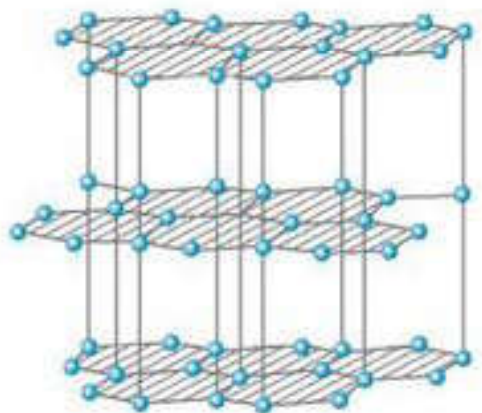


Рис. 15.3



Рис. 15.4

Пространственная решетка. Правильное расположение частиц в решетке кристалла является причиной **анизотропии кристаллов**: зависимость каких-либо свойств кристаллов от направления.

У многих кристаллов очень ярко выражена зависимость механической прочности кристалла от направления. Например, слюда легко расщепляется на пластинки, каменная соль раскалывается на кубики и т.д. Особенно заметна эта зависимость у графита. В каждом слое кристалла графита атомы углерода расположены в вершинах правильных шестиугольников (рис. 15.3), а расстояние между соседними слоями в 2,5 раза больше, чем расстояние между ближайшими атомами углерода в каждом слое. Поэтому слой в кристалле графита легко сдвигаются относительно друг друга. Соскальзыванием слоев графита мы пользуемся, когда пишем карандашом. Это же свойство графита позволяет применять его как смазочный материал (особенно часто его используют при высоких температурах).

Если на поверхность кристалла кварца нанести слой воска и коснуться концом сильно нагретой проволоки середины грани кристалла (рис. 15.4), то воск расплавляется по эллипсу. Значит, теплопроводность кристалла кварца зависит от направления.

Опыты показывают зависимость от направления и многих других свойств кристаллов.

Анизотропией обладают только монокристаллы. Большинство твердых веществ имеют *поликристаллическое строение* (от греч. *поли* — “много”), т. е. они состоят из множества очень мелких кристалликов, иногда различных только в микроскоп. Поскольку эти кристаллики относительно друг друга расположены хаотически, твердое тело в целом является изотропным, т. е. имеет одинаковые свойства по всем направлениям, хотя каждый отдельный кристаллик обладает анизотропией. Аморфные тела тоже изотропны, так как у них нет правильной пространственной решетки. Различие между поликристаллическими и аморфными телами в этом отношении заключается в том, что у поликристаллических тел всегда можно выделить достаточно малую часть тела, в которой обнаружится анизотропия, а аморфные вещества изотропны при любых размерах тела или его части.

Опыт показал, что идеального дальнего порядка в расположении частиц твердого вещества на практике никогда не встречается. Любые отступления от идеального порядка в кристалле называют *дефектами пространственной решетки*. Одним из важнейших дефектов решетки является нарушение правильного расположения частиц кристалла в каждый момент времени, обусловленное тепловым движением этих частиц. Действительно, поскольку частицы непрерывно колеблются, узлы определяют лишь среднее положение каждой частицы. Еще одним важным дефектом является нарушение в строении самой решетки, называемое *дислокацией* (рис. 15.5). Часто встречается дефект, заключающийся в отсутствии частиц в отдельных узлах решетки (*вакансия*) или в смещении частиц в промежуток между узлами. Дефектом кристаллической решетки являются и чужеродные атомы в отдельных узлах решетки (рис. 15.6) или между узлами.

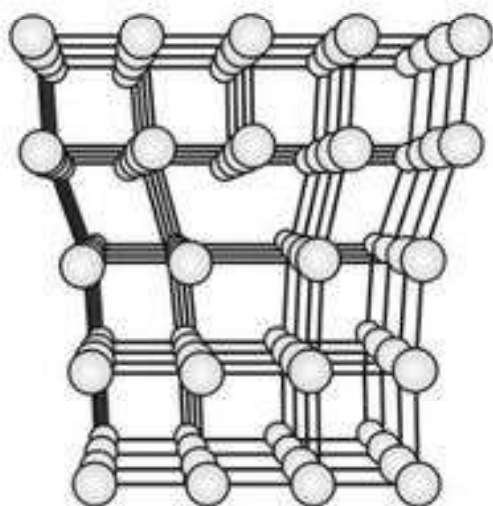


Рис. 15.5

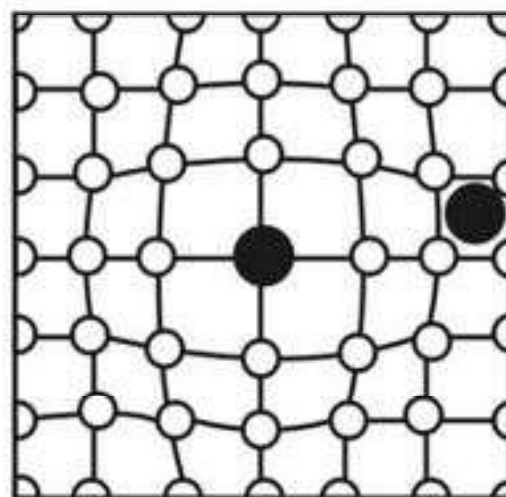


Рис. 15.6

Дефекты решетки в кристаллах сильно влияют на многие свойства твердых тел, например, на прочность, пластичность, электрическую проводимость и т. д.

Виды кристаллических структур. Различные типы кристаллов и возможное расположение узлов в пространственной решетке изучает *кристаллография*. В физике кристаллические структуры рассматривают не с точки зрения их геометрии, а по характеру сил, действующих между частицами кристалла, т. е. по типу связей между частицами, находящимися в узлах решетки кристалла. Различают четыре типичные кристаллические структуры: *ионную*, *атомную*, *молекулярную* и *металлическую*.

Вопросы для самоконтроля

1. Назовите свойства аморфных тел. Приведите примеры аморфных тел.
2. Назовите свойства кристаллов. Приведите примеры кристаллических тел.
3. Что называют *монокристаллами*?
4. Какие точки в кристаллической решетке называются *узлами решетки*? Как они расположены?
5. Какие дефекты кристаллических решеток вы знаете?
6. Какие тела имеют *полукристаллическое строение*?
7. Какие виды кристаллических структур вы знаете?

Что освоили по этой теме?

Насколько полезна и интересна была для вас полученная информация?	Что еще вы хотели бы узнать по данной теме?	Какие вопросы возникли у вас в ходе изучения темы?

§ 16. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории газов

Ключевые понятия: давление газа, основное уравнение молекулярно-кинетической теории газов.

На этом уроке вы:

опираясь на модель идеального газа, научитесь объяснять передачу давления газами.

Вспомним известный вам факт, что давление газа на стенки сосуда, в который он заключен (или на любую другую поверхность), обусловлено ударами молекул с некоторой силой. Давление газа равно отношению этой силы к площади стенки:

$$p = \frac{F}{S}.$$

Пусть газ заключен в сосуд, имеющий форму куба. Частицы газа, движущиеся хаотично и с большой скоростью, все время бомбардируют стенки сосуда, подобно дождевым каплям, барабанившим по крыше (рис. 16.1).

Вследствие хаотичности молекулярного движения скорости ударяющихся о стенку молекул и их число в различные моменты времени различны. Это означает, что и давление в разные моменты времени тоже различно. Но при большом числе молекул давление газа в среднем не меняется, хотя и имеются небольшие отклонения (*флуктуации*) в ту и другую сторону. Если же количество молекул мало, то их скорость и число ударов о стенки в различные моменты будут резко отличаться. В некоторый момент времени может даже вообще не произойти удара о данную стенку. Флуктуации давления в этом случае будут очень велики, а в отдельном случае (одна или несколько молекул) понятие давления вообще теряет смысл.

Таким образом, *давление газа* — это величина, характеризующая состояние большого числа молекул, т. е. макроскопическая величина. Понятие *давление*, как и ряд других известных вам понятий — *температура*, *плотность*, *вязкость*, *теплопроводность*, выражает свойства системы частиц и неприменимо к отдельно взятой молекуле. Так как молекул очень много, и ударяются они о стенку очень часто, то можно заменить их суммарное воздействие на поверхность стенки одной непрерывно действующей средней силой. Тогда ве-

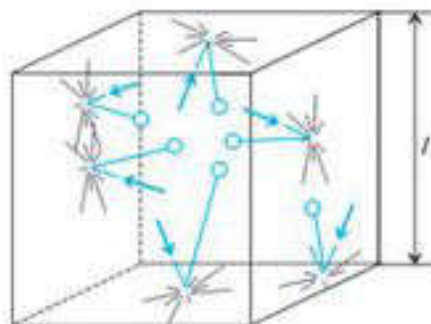


Рис. 16.1

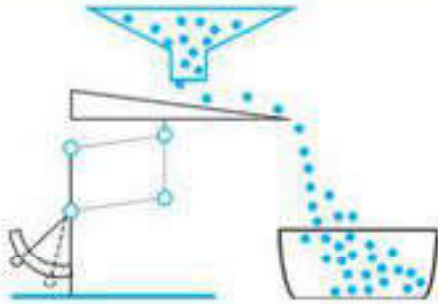


Рис. 16.2

личина этой силы, приходящаяся на единицу поверхности стенки, будет равна давлению, оказываемому газом на стенку сосуда.

Аналогичное действие можно наблюдать с помощью следующего модельного опыта. Большое количество шариков падает на подвижную площадку в единицу времени. Силы ударов каждого из шариков сливаются в общую среднюю силу давления, которую и показывает стрелка

прибора. Для определения величины давления эту силу следует разделить на площадь подвижной площадки (рис. 16.2).

Вы ознакомились с качественным объяснением давления газа на основе молекулярно-кинетической теории.

Вычислим теперь с помощью молекулярно-кинетической теории давление газа на стенки сосуда, используя модель идеального газа. Поскольку давление обусловлено ударами молекул, нужно найти суммарную силу ударов всех молекул и разделить ее на площадь стенки.

Допустим, что мы имеем сосуд, имеющий форму куба с ребром l , в котором находится идеальный газ, концентрация молекул n в котором равна

$$n = \frac{N}{V},$$

где N — общее число молекул; V — объем сосуда.

Для простоты решения поставленной задачи введем ряд предположений.

1. Все молекулы имеют одинаковую массу m_0 .
2. В сосуде находится одно вещество, т. е. один вид молекул.
3. Все молекулы имеют одинаковые значения скорости v .
4. Все направления в газе равноценны, и молекулы движутся только вдоль трех взаимно перпендикулярных направлений (рис. 16.3).

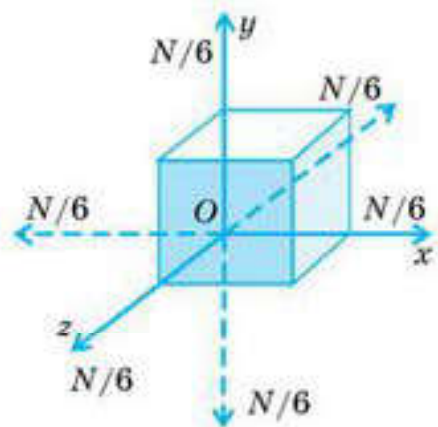


Рис. 16.3

5. В любой момент времени вдоль каждого из этих трех направлений одновременно будут двигаться $\frac{N}{3}$ молекул, причем половина из них (т. е. $\frac{N}{6}$) перемещается, например, в положительном направлении оси Ox , другая половина — в противоположном направлении оси Ox . Это справедливо и для положительных направлений осей Oy и Oz .

6. Молекулы газа движутся от одной грани куба до другой, не сталкиваясь друг с

другом. Соударения же их со стенками являются абсолютно упругими.

Рассмотрим движение одной молекулы, летящей от левой стенки куба до правой и обратно по оси Ox .

1. Найдем импульс, который сообщается стенке ударяющейся об нее молекулой. Пусть импульс молекулы до удара о стенку направлен по оси Ox и равен $p_1 = m_0 v$.

После упругого удара ее о стенку импульс изменяет знак (рис. 16.4) и равен $p_2 = -m_0 v$.

Изменение импульса молекулы равно:

$$\Delta p = p_2 - p_1 = -m_0 v - (m_0 v) = -2 m_0 v.$$

По закону сохранения импульса, стенка получает при ударе импульс вдоль оси Ox , равный:

$$\Delta p = 2 m_0 v.$$

2. Найдем среднюю силу, действующую со стороны одной молекулы на стенку. Согласно второму закону Ньютона:

$$\bar{F} \Delta t = \Delta \vec{p},$$

где \bar{F} — сила удара; Δt — время удара.

Отскочив от стенки, молекула летит к противоположной грани и, ударившись об нее, возвращается назад. Время ее движения в оба конца (или время между двумя отскоками молекулы) равно $\Delta t = \frac{2l}{v}$.

Подставив значения Δt и Δp во второй закон Ньютона, получим

$$F \cdot \frac{2l}{v} = 2 m_0 v.$$

Отсюда найдем среднюю силу \bar{F} , действующую на стенку куба:

$$\bar{F} = \frac{2 m_0 v}{2 \frac{l}{v}} = \frac{m_0 v^2}{l},$$

где \bar{F} — средняя сила.

3. Найдем полную силу, действующую на стенку куба в результате ударов всех молекул. Учтем, что о стенку куба площадью S ударяется не одна, а $\frac{N}{3}$ молекул, движущихся между левой и правой стенками (т. е. по оси Ox).

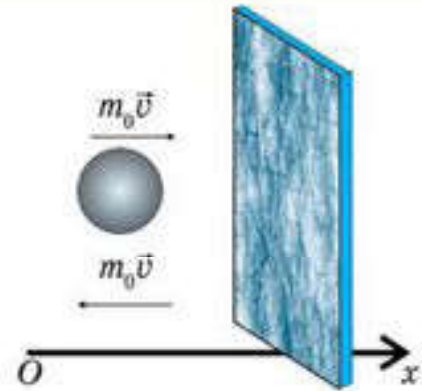


Рис. 16.4

Сила, действующая на стенку со стороны всех молекул, равна

$$F = \frac{N m_0 v^2}{3 l}.$$

4. Найдем давление газа на стенку сосуда. Оно равно

$$p = \frac{F}{S} = \frac{N m_0 v^2}{3 l S}.$$

Учитывая, что $V = l \cdot S$ — объем газа в кубе, а $n = \frac{N}{V}$ — концентрация молекул, т. е. число молекул в единице объема газа, получим:

$$p = \frac{1}{3} n m_0 v^2. \quad (16.1)$$

В действительности же, согласно определению Максвелла, молекулы газа движутся с разными скоростями. Вследствие этого вместо принятой в допущении одинаковой для всех молекул скорости в формулу (16.1) вместо квадрата скорости мы должны подставить среднее значение квадрата скорости всех молекул: \bar{v}^2 . Окончательно получим:

$$p = \frac{1}{3} n m_0 \bar{v}^2. \quad (16.2)$$

Выражение (16.2) носит название *основное уравнение молекулярно-кинетической теории газов*, или *уравнение Клаузиуса* — по имени ученого, который его вывел.

Основное уравнение молекулярно-кинетической теории газов (16.2) показывает, что давление газа прямо пропорционально концентрации молекул и среднему значению квадрата скорости поступательного движения молекул. Чем больше концентрация молекул, тем чаще молекулы будут сталкиваться со стенками сосуда, и, следовательно, больше будет давление.

Основное уравнение молекулярно-кинетической теории газов иногда записывают в несколько ином виде. Умножив и разделив правую часть уравнения (16.2) на 2, получим

$$p = \frac{2}{3} n \cdot \frac{m_0 \bar{v}^2}{2},$$

но $\frac{m_0 \bar{v}^2}{2} = \bar{E}_k$ — средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул. Следовательно,

$$p = \frac{2}{3} n \bar{E}_k. \quad (16.3)$$

Давление идеального газа равно 2/3 средней кинетической энергии поступательного движения всех молекул, заключенных в единице объема.

Зная, что произведение $m \cdot n_0$ в формуле (16.2) представляет плотность вещества ρ :

$$\rho = m n_0,$$

можно получить еще один вид основного уравнения молекулярно-кинетической теории для вычисления давления:

$$p = \frac{1}{3} \rho \bar{v}^2. \quad (16.4)$$

Давление идеального газа пропорционально плотности газа и среднему квадрату скорости поступательного движения молекул газа.

Таким образом, с помощью модели идеального газа теоретически была установлена связь между микроскопическими и макроскопическими параметрами. К **микроскопическим параметрам** относятся: масса молекулы, число молекул в единице объема (концентрация молекул), среднее значение квадрата скорости их хаотического движения (или среднее значение кинетической энергии теплового движения молекул); к **макроскопическим**: давление на стенки сосуда, непосредственно измеряемое на опыте и характеризующее газ как целое.

Вопросы для самоконтроля

1. Какой величиной называется давление газа?
2. Как можно вычислить концентрацию молекул газа?
3. Что показывает основное уравнение молекулярно-кинетической теории газа?
4. Чему равно давление идеального газа?
5. Что относится к микроскопическим параметрам? А к макроскопическим параметрам?

Что освоили по этой теме?

Насколько полезна и интересна была для вас полученная информация?	Что еще вы хотели бы узнать по данной теме?	Какие вопросы возникли у вас в ходе изучения темы?

§ 17. Уравнение состояния идеального газа

Ключевые понятия: уравнение состояния идеального газа, универсальная газовая постоянная.

На этом уроке вы:

познакомитесь с физическим смыслом универсальной газовой постоянной; научитесь применять уравнение состояния идеального газа при решении задач.

Уравнение состояния идеального газа. Для того чтобы установить, в каком состоянии находится газ, нам необходимо знать его термодинамические параметры: давление p , температуру T , объем V . Изменение одного из термодинамических параметров приводит к изменению других его параметров. Уравнение, которое связывает между собой термодинамические параметры, называется **уравнением состояния газа**. Выведем это уравнение, используя основное уравнение молекулярно-кинетической теории.

Нам известно, что $p = nkT$. Так как концентрация молекул газа по определению равна $n = \frac{N}{V}$, то $p = \frac{N}{V}kT$, откуда следует, что $pV = NkT$. Число молекул газа найдем, зная количество вещества газа: $N = \nu N_A = \frac{m}{M}N_A$. С учетом этого получим: $pV = \frac{m}{M}N_AkT$.

Величина, равная произведению двух постоянных чисел — постоянной Авогадро и постоянной Больцмана, сама будет постоянной величиной. Ее назвали **универсальной газовой постоянной**:

$$R = kN_A. \quad (17.1)$$

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

Универсальная газовая постоянная — это физическая величина, показывающая, какое количество теплоты необходимо передать 1 моль вещества, чтобы увеличить его температуру на 1 К.

С учетом сказанного получим, что для идеального газа справедливо следующее уравнение:

$$pV = \frac{m}{M}RT. \quad (17.2)$$

Это уравнение называется **уравнением состояния идеального газа**. В таком виде оно впервые было получено русским ученым Д. И. Менделеевым (1834—1907) и поэтому носит название **уравнение Менделеева — Клапейрона**. Бенуа Клапейрон (1799—1864), французский физик и инженер, работавший в течение 10 лет в России, получил уравнение состояния идеального газа раньше Менделеева (в 1834 г.), но в другой форме.

Уравнение состояния идеального газа — первое из замечательных обобщений в физике, вобравшее в себя ряд экспериментально открытых газовых законов. Именно к таким обобщениям стремится физика — к нахождению наиболее общих законов, не зависящих от тех или иных веществ.

Если переписать уравнение Менделеева — Клапейрона в виде $\frac{pV}{T} = \frac{m}{M} R$, то получим, что в правой части уравнения расположена постоянная величина, зависящая только от молярной массы газа, т.е. для данного газа эта величина постоянная. Тогда можно записать:

$$\frac{pV}{T} = \text{const.} \quad (17.3)$$

Именно в таком виде и получил уравнение состояния идеального газа Б. Клапейрон.

Приведем еще один интересный факт. Если написать уравнение состояния для одного моль идеального газа, находящегося при нормальных условиях, т.е. при давлении $p = 101325$ Па и температуре $T = 273$ К, то газ займет объем $V = 22,4$ л/моль. Тогда величина $\frac{pV}{T} = \frac{101325 \cdot 22,4 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{м}^3}{273 \text{ К} \cdot \text{моль}} = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{моль}}$ — это и есть **универсальная газовая постоянная**.

Подумайте, что означает этот факт.

Вопросы для самоконтроля

1. Какое уравнение называют *уравнением состояния идеального газа*?
2. Как вывести уравнение состояния идеального газа?
3. Почему газовая постоянная называется *универсальной*?
- *4. Каким образом можно проверить применимость уравнения состояния идеального газа для описания свойств реальных газов?
5. Выведите уравнение Менделеева — Клапейрона.

Примеры решения задач

1. Концентрация молекул межзвездного газа в среднем равна 1 м^{-3} , средняя кинетическая энергия молекул газа $1,5 \cdot 10^{-21}$ Дж. Определите давление межзвездного газа.

Д а н о:

$$n = 1 \text{ м}^{-3}$$

$$\bar{E} = 1,5 \cdot 10^{-21} \text{ Дж}$$

p — ?

Решение. Применим основное уравнение (16.3) молекулярно-кинетической теории, устанавливающее связь между давлением идеального газа, концентрацией и средней кинетической энергией теплового движения частиц: $p = \frac{2}{3} n \bar{E}_x$.

Вычисления дают: $p = \frac{2}{3} \cdot 1 \text{ м}^{-3} \cdot 1,5 \cdot 10^{-21} \text{ Дж} = 1 \cdot 10^{-21} \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3} =$
 $= 10^{-21} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{м}^3} = 10^{-21} \text{ Н/м}^2 = 10^{-21} \text{ Па}.$

Ответ : $10^{-21} \text{ Па}.$

2. Считая воздух газом, состоящим из одинаковых молекул, оцените скорость теплового движения молекул воздуха при нормальных условиях.

Д а н о:

$$p = 1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$\rho_{\text{возд.}} = 1,29 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

p — ?

Решение . Применим уравнение молекулярно-кинетической теории, устанавливающее связь давления газа с его плотностью и средним значением квадрата скорости (16.4):

$$p = \frac{1}{3} \rho \bar{v}^2.$$

Из этого уравнения для средней скорости молекул газа получим выражение: $\bar{v} = \sqrt{\frac{3p}{\rho}}$; $\bar{v} = \sqrt{\frac{3 \cdot 1,01 \cdot 10^5}{1,29}} \frac{\text{м}}{\text{с}} = 280 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$

Ответ : $280 \frac{\text{м}}{\text{с}}$

Упражнение 7

1. На дне цилиндра, заполненного воздухом (плотность воздуха $1,29 \text{ кг/м}^3$), находился пробковый шарик. До какого давления нужно довести идеальный газ, чтобы шарик висел в сжатом воздухе? Температура не меняется. Плотность сжатого воздуха 200 кг/м^3 .
2. Чему равна концентрация молекул воздуха в колбе радиолампы, если давление внутри колбы равно 10^5 Па , а средняя кинетическая энергия молекул воздуха $5 \cdot 10^{-21} \text{ Дж}$?
3. Определите среднюю кинетическую энергию поступательного движения молекул идеального газа с концентрацией $3 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$ при давлении 10^5 Па .
4. Сравните давление кислорода и водорода при одинаковых концентрациях молекул и равных средних квадратичных скоростях их движения.
5. Определите недостающие параметры в таблице 17.1:

Таблица 17.1

Газ	$p, \text{ Па}$	$n, \text{ м}^{-3}$	$v^2, \text{ м}^2/\text{с}^2$	$m_0, \text{ кг}$
CO_2	?	$2,7 \cdot 10^{20}$	$9 \cdot 10^4$	$7,3 \cdot 10^{-26}$
O_2	$5 \cdot 10^{-21}$	10^{24}	?	$5,3 \cdot 10^{-26}$
H_2	$4 \cdot 10^{-21}$?	$2,5 \cdot 10^5$	$3,3 \cdot 10^{-27}$

Что освоили по этой теме?

Насколько полезна и интересна была для вас полученная информация?

Что еще вы хотели бы узнать по данной теме?

Какие вопросы возникли у вас в ходе изучения темы?

§ 18. Изопроцессы

Ключевые понятия: изопроцессы, изотермический процесс, термостат, закон Бойля — Мариотта, изотерма идеального газа, изобарный процесс, закон Гей-Люссака, изохорный процесс, закон Шарля, закон Дальтона, парциальное давление.

На этом уроке вы:

познакомитесь с изотермическим, изобарным и изохорным процессами и научитесь выводить законы Бойля — Мариотта, Гей-Люссака и Шарля; научитесь строить графики изопроцессов, применять формулы данных законов при решении задач.

Уравнение состояния получено на основании экспериментальных газовых законов Бойля — Мариотта и Гей-Люссака.

Для данной массы идеального газа произведение давления на объем, деленное на абсолютную температуру, есть величина постоянная.

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} = \text{const.} \quad (18.1)$$

Покажем, что уравнение состояния есть частный случай основного уравнения кинетической теории газов:

$$\bar{E} = \frac{3}{2} kT; \quad p = \frac{2}{3} n \bar{E}. \quad (18.2)$$

Выразим кинетическую энергию идеального газа через молярную газовую постоянную и постоянную Авогадро:

$$p = \frac{2}{3} n \bar{E} = \frac{2N}{3V} \cdot \frac{3RT}{2N_A}, \quad p = \frac{N}{N_A} \frac{RT}{V} = \frac{m}{M} \frac{RT}{V}.$$

Тогда

$$pV = \frac{m}{M} RT. \quad (18.3)$$

Выражение (18.3) — уравнение Менделеева — Клапейрона. Оно позволяет найти любой параметр газа по известным остальным.

Предположим, что масса m газа и его молярная масса M неизменны, тогда $\frac{mR}{M} = \text{const}$ и уравнение Менделеева — Клапейрона можно записать в виде:

$$pV = T \cdot \text{const} \quad \text{или} \quad \frac{pV}{T} = \text{const}.$$

Это и есть уравнение состояния, что и требовалось вывести.

Из уравнения состояния можно получить формулы газовых законов, найденных экспериментально.



Роберт Бойль
(1627—1691)

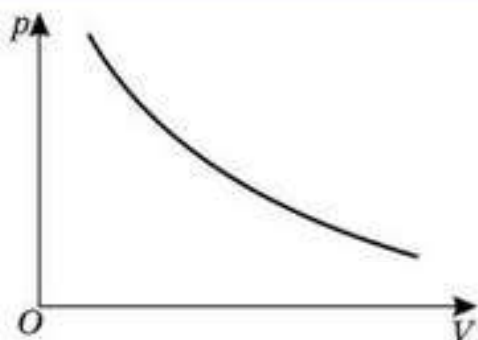


Рис. 18.1

Изотермический процесс ($T = \text{const}$). Из уравнения Менделеева — Клапейрона получим $pV = \text{const}$, откуда

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1} \text{ (закон Бойля — Мариотта) .}$$

При изотермическом процессе давление данного газа постоянной массы обратно пропорционально его объему (рис. 18.1).

Если изотермически сжимать газ, то, согласно молекулярно-кинетической теории, объем газа уменьшится. Так как средняя скорость движения молекул не изменилась, то число ударов о стенки сосуда возрастает. Следовательно, возрастает и давление газа.

С энергетической точки зрения вся подводимая при изотермическом сжатии энергия благодаря теплообмену передается окружающим телам (например, холодильнику в тепловой машине).

Изобарный процесс ($p = \text{const}$). Из уравнения Менделеева — Клапейрона получим $\frac{V}{T} = \text{const}$, откуда

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2} \text{ (закон Гей-Люссака) .}$$

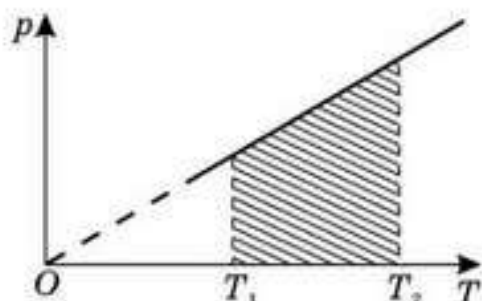


Рис. 18.2

При изобарном процессе объем данного газа постоянной массы прямо пропорционален его абсолютной температуре.

Заштрихованная площадь, ограниченная изобарой, начальной и конечной ординатами, численно равна работе газа при изобарном расширении (рис. 18.2):

$$A = p\Delta V.$$

Подводимая теплота затрачивается и на совершение работы, и на увеличение внутренней энергии.

Изохорный процесс ($V = \text{const}$). Из уравнения Менделеева — Клапейрона получим $\frac{p}{T} = \text{const}$, откуда

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2} \text{ (закон Шарля) .}$$

При изохорном процессе давление данного газа постоянной массы прямо пропорционально его абсолютной температуре.

Заштрихованная на рисунке 18.3 площадь равна изменению энергии молекул газа при нагревании от температуры T_1 до T_2 (рис. 18.3). Так как объем не изменяется, то газ не совершает работы и все подводимое количество теплоты идет на увеличение внутренней энергии.

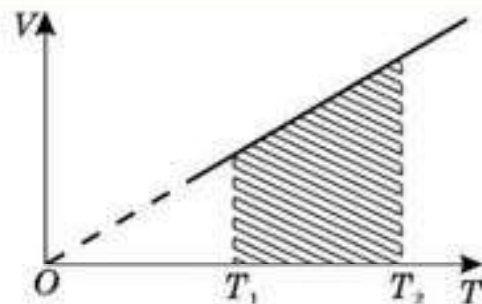


Рис. 18.3

Таким образом, все газовые законы могут быть получены из основного уравнения молекулярно-кинетической теории газов.

Используя уравнение Менделеева — Клапейрона, имеем

$$\rho = \frac{pM}{RT}, \text{ где } \rho = \frac{m}{V}.$$

Для смеси газов справедливы законы *Дальтона* :

- 1) давление смеси газов равно сумме парциальных давлений;
- 2) объем смеси газов равен объему каждого из газов в отдельности.

Парциальным давлением называется давление, которое оказывал бы каждый газ из смеси, если бы он один занимал весь данный объем. Дальтон установил, что давление смеси газов равно сумме парциальных давлений всех газов, составляющих данную смесь, т. е. $p = p_1 + p_2 + \dots + p_n$.

Это утверждение называется *законом Дальтона*. Его легко получить, используя основное уравнение молекулярно-кинетической теории:

$$\begin{aligned} p &= nkT = n_1kT + n_2kT + \dots + n_nkT = \\ &= p_1 + p_2 + \dots + p_n, \text{ т. е. } p = p_1 + p_2 + \dots + p_n. \end{aligned} \quad (18.4)$$

Закон Дальтона позволяет рассчитать молярную массу смеси газов при любом соотношении масс составляющих ее газов. При решении задач реальный газ можно приближенно принимать за идеальный (при небольшом давлении и не слишком низкой температуре).

В задачах на применение газовых законов очень важно провести анализ. В ходе анализа необходимо ответить на следующие вопросы:

- а) является ли данный газ реальным или идеальным?
- б) какому процессу соответствует изменение состояния газа?

Вопросы для самоконтроля

1. Расскажите об изотермическом процессе, сформулируйте закон Бойля — Мариотта.
2. Расскажите об изобарном процессе, сформулируйте закон Гей-Люссака.
3. Расскажите об изохорном процессе, сформулируйте закон Шарля.
4. Начертите графики (изобару, изохору, изотерму) в диаграммах pV , VT , pT .
- *5. Выведите объединенный закон Бойля — Мариотта и Гей-Люссака на основе экспериментальных законов и из основного уравнения молекулярно-кинетической теории газов.

- *6. Запишите уравнение Менделеева — Клапейрона, поясните область его применения и связь с уравнением состояния и основным уравнением кинетической теории газов.
7. Как формулируется закон Дальтона?
8. Используя закон Дальтона, выведите формулу для расчета смеси молярной массы двух газов, массы и молярные массы которых, соответственно, равны m_1 и M_1 , m_2 и M_2 .

Пример решения задачи

В баллоне емкостью 100 л находится газ под давлением $4,9 \cdot 10^5$ Па. Какой объем займет газ при нормальном атмосферном давлении ($1,01 \cdot 10^5$ Па), если его температура не меняется?

Д а н о:

$$V = 100 \text{ л} = 0,1 \text{ м}^3$$

$$p_1 = 4,9 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$p_2 = 1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$V_2 = ?$$

Решение. При изотермическом процессе по закону Бойля — Мариотта: $p_1 V_1 = p_2 V_2$, откуда

$$V_2 = \frac{p_1 V_1}{p_2}; V_2 = \frac{4,9 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 0,1 \text{ м}^3}{1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}} = 0,48 \text{ м}^3.$$

Ответ: 0,48 м³.

Упражнение 8

1. Сосуд, содержащий газ под давлением $1,4 \cdot 10^5$ Па, соединили с пустым сосудом объемом 6 л. После этого в обоих сосудах установилось давление $1 \cdot 10^5$ Па. Найдите объем первого сосуда.
2. При сжатии газа его объем уменьшился с 8 до 5 л, а давление повысилось на 60 кПа. Найдите первоначальное давление газа.

Что освоили по этой теме?

Насколько полезна и интересна была для вас полученная информация?

Что еще вы хотели бы узнать по данной теме?

Какие вопросы возникли у вас в ходе изучения темы?

§19. Первый закон термодинамики

Ключевые понятия: количество теплоты, работа, первый закон термодинамики, функция состояния.

На этом уроке вы:

узнаете, каким образом можно изменить внутреннюю энергию термодинамической системы, смысл первого закона термодинамики как закона сохранения энергии применительно к механической и тепловой энергии.

Вам известно, что внутреннюю энергию тела можно изменить в процессе теплопередачи или совершения работы. В реальных условиях оба способа передачи энергии системе могут происходить одновременно.

Например, вспомним опыт с воздушным огнивом. Если резко ударить по рукоятке воздушного огнива, то воздух в цилиндре сожмется (рис. 19.1). После прекращения действия внешней силы сжатый воздух расширится и выбросит поршень из цилиндра.

Этот опыт показывает, что возможны взаимные превращения различных видов энергии. Сначала механическая энергия превращается во внутреннюю энергию сжатого газа, затем внутренняя энергия газа превращается в механическую энергию поступательного движения поршня. Аналогично газ в цилиндре под поршнем может нагреваться за счет передачи ему определенного количества теплоты, и одновременно может выполняться работа по его расширению или сжатию.

Из курса физики для 8—9 классов вы знаете, что все процессы в природе подчиняются закону сохранения и превращения энергии. К выводу о существовании закона сохранения энергии независимо друг от друга пришли в середине XIX в. немецкий ученый Р. Майер, английский ученый Д. Джоуль и немецкий ученый Г. Гельмгольц на основе анализа результатов опытов и наблюдений природных явлений.

Напомним, что, согласно закону сохранения и превращения энергии: *во всех процессах, происходящих в природе, при любых взаимодействиях тел, энергия не исчезает бесследно и не возникает из ничего. Энергия только передается от одного тела к другому или превращается из одного вида в другой.*

Естественно, что и процессы изменения внутренней энергии тела также происходят в соответствии с этим законом.

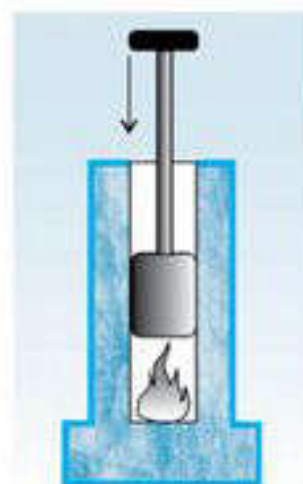


Рис. 19.1

После того, как мы выяснили, что внутреннюю энергию можно изменять не только при совершении работы, но и при теплопередаче, закон сохранения можно обобщить на основе тепловых процессов.

В термодинамической системе изменение внутренней энергии ΔU системы при переходе ее из одного состояния в другое равно сумме количества теплоты, переданного системе, и работы внешних сил и не зависит от способа, которым осуществляется этот переход :

$$\Delta U = Q + A. \quad (19.1)$$

Это обобщение закона сохранения и превращения энергии для термодинамической системы называется *первым законом термодинамики*.

Часто вместо работы внешних сил над системой рассматривают работу A' , совершаемую термодинамической системой над внешними телами. Так как эти работы равны по модулю, но противоположны по знаку, т. е. $A = -A'$, то первый закон термодинамики можно записать так:

$$\Delta U = Q - A', \text{ или } Q = \Delta U + A'. \quad (19.2)$$

Количество теплоты Q , переданное системе, идет на изменение ее внутренней энергии ΔU и на совершение работы самой системы над внешними телами.

Первый закон термодинамики носит всеобщий характер и применим к любым без исключения явлениям природы.

Исторически установление этого закона было связано с попытками создать машину, способную совершать полезную работу бесконечно долго, не получая энергию извне и без каких-либо изменений внутри самой машины. В термодинамике такую воображаемую машину называют *вечным двигателем первого рода (perpetuum mobile I)*. Все попытки создать вечный двигатель окончились неудачей. Невозможность создания вечного двигателя первого рода следует из первого закона термодинамики. Так как в этом случае $Q = 0$, то работа A' , произведенная машиной, в соответствии с уравнением (19.2) может быть совершена лишь за счет убыли внутренней энергии: $A' = -\Delta U$. После того как запас внутренней энергии окажется исчерпанным, двигатель перестанет работать. Отсюда следует невозможность построения вечного двигателя первого рода, так как нельзя бесконечно долго совершать работу за счет конечного значения внутренней энергии какой-либо системы (машины).

Предположим, что система изолирована, т. е. над ней извне не совершается работа ($A = 0$) и она не обменивается теплотой с окружающими телами ($Q = 0$). В этом случае, согласно первому закону термодинамики, изменение внутренней энергии равно 0, т. е.

$$\Delta U = U_2 - U_1 = 0 \text{ или } U_1 = U_2.$$

В изолированной системе тел внутренняя энергия остается неизменной (сохраняется).

Вопросы для самоконтроля

1. В чем заключается смысл закона сохранения энергии?
2. Как формулируется первый закон термодинамики? Запишите его формулу.
3. К каким системам применим первый закон термодинамики?
4. Какую машину называют *вечным двигателем первого рода*? Почему невозможен такой двигатель?
5. Какая из трех величин, входящих в формулу первого закона термодинамики, зависит от температуры системы?
6. Примените первый закон термодинамики для случая, когда происходит теплообмен между телами в калориметре.
7. Примените первый закон термодинамики для случая нагревания воды на спиртовке.
- *8. Примените первый закон термодинамики для случая, когда тело нагревается при ударе.

Что освоили по этой теме?

Насколько полезна и интересна была для вас полученная информация?	Что еще вы хотели бы узнать по данной теме?	Какие вопросы возникли у вас в ходе изучения темы?

§ 20. Применение первого закона термодинамики к термодинамическим процессам

Ключевые понятия: изохорный процесс, изобарный процесс, изотермический процесс, адиабатный процесс.

На этом уроке вы: научитесь применять первый закон термодинамики к различным изопроцессам.

Первый закон термодинамики позволяет рассмотреть термодинамические процессы в газах с энергетической точки зрения. На примере известных вам изопроцессов в идеальном газе рассмотрим изменения его внутренней энергии. Мы знаем, что *внутренняя энергия идеального газа есть кинетическая энергия движения его молекул, которая определяется его температурой*. Потенциальной энергией взаимодействия для случая идеального газа пренебрегают.

Изотермический процесс — процесс перехода газа из одного состояния в другое при постоянной температуре, т. е. $T = \text{const}$ (изотермическое расширение или сжатие газа, см. рис. 19.1). Следовательно, постоянной остается и внутренняя энергия газа $U = \text{const}$, а $\Delta U = 0$, тогда уравнение $(E_k + E_n = \text{const})$ принимает вид:

$$Q_T = A'_T. \quad (20.1)$$

(Индекс T означает, что процесс происходит при $T = \text{const}$.) На основании первого закона термодинамики при изотермическом процессе все сообщенное газу количество теплоты равно работе, совершаемой газом против внешних сил.

Изохорный процесс — процесс перехода газа из одного состояния в другое при постоянном объеме, т. е. при $V = \text{const}$. Если подвергнуть газ, заключенный в закрытом цилиндре, нагреванию, то он не может совершить работу над внешними телами, т. е. $A' = 0$. Согласно первому закону термодинамики $Q = \Delta U + A'$, при $V = \text{const}$ и $A' = 0$ все сообщенное газу количество теплоты расходуется на увеличение его внутренней энергии:

$$Q_V = \Delta U_V \quad (20.2)$$

Изобарный процесс — процесс перехода газа из одного состояния в другое при постоянном давлении, т. е. при $p = \text{const}$.

Изобарное расширение газа происходит при передаче количества теплоты Q_p газу, заключенному под поршнем. Согласно первому закону термодинамики, при $p = \text{const}$ сообщенное газу количество теплоты расходуется на увеличение внутренней энергии ΔU_p и на совершение работы A' против внешних сил при перемещении поршня:

$$Q_p = \Delta U_p + A' \quad (20.3)$$

Об увеличении внутренней энергии свидетельствует увеличение температуры.

Найдем работу газа при изобарном расширении. Поскольку расширение газа происходит при $p = \text{const}$, то постоянной будет и сила давления $F = p \cdot S$. При подъеме поршня на высоту $\Delta h = h_2 - h_1$ работа газа равна $A' = F \cdot \Delta h$. После подстановки в нее формулы силы давления получим:

$$A' = p \cdot S \cdot \Delta h = pS(h_2 - h_1).$$

Но произведение $S \cdot \Delta h$ равно изменению объема газа:

$$\Delta V = V_2 - V_1,$$

поэтому

$$A' = p\Delta V = p(V_2 - V_1). \quad (20.4)$$

Работа газа при изобарном расширении равна произведению давления газа на изменение его объема.

Графически работа газа при изобарном процессе в координатах V, p равна площади заштрихованного прямоугольника, ограниченного изобарой и ординатами начального и конечного объемов (рис. 20.1).

Алгебраический расчет работы сложен, а графически работу легко можно вычислить. В любом процессе работа газа равна площади, огра-

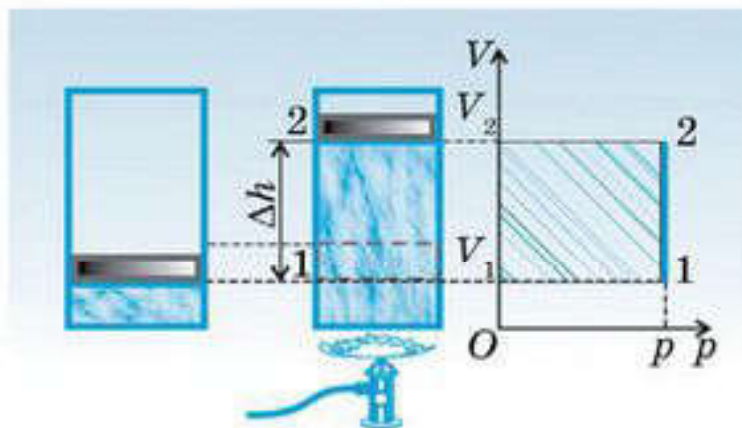


Рис. 20.1

ниченной графиком процесса (в координатах p, V), осью V и вертикальными прямыми через значения V_1 и V_2 (рис. 20.2, а, б).

Адиабатный процесс. Кроме изобарного, изохорного и изотермического процессов, в термодинамике часто рассматриваются адиабатные процессы.

Адиабатным процессом называется процесс, происходящий в термодинамической системе при отсутствии теплообмена с окружающими телами, т. е. при условии $Q = 0$.

Отсутствие теплообмена с окружающей средой может быть обеспечено хорошей теплоизоляцией газа. Быстрые процессы расширения или сжатия газа могут быть близкими к адиабатному и при отсутствии теплоизоляции, если время, за которое происходит изменение объема газа, значительно меньше времени, необходимого для установления теплового равновесия газа с окружающими телами.

Примерами адиабатных процессов могут служить процессы сжатия воздуха в цилиндре воздушного огня, в цилиндре двигателя внутреннего сгорания. В соответствии с первым законом термодинамики, при адиабатном сжатии изменение внутренней энергии газа ΔU равно работе внешних сил A :

$$\Delta U = A. \tag{20.5}$$

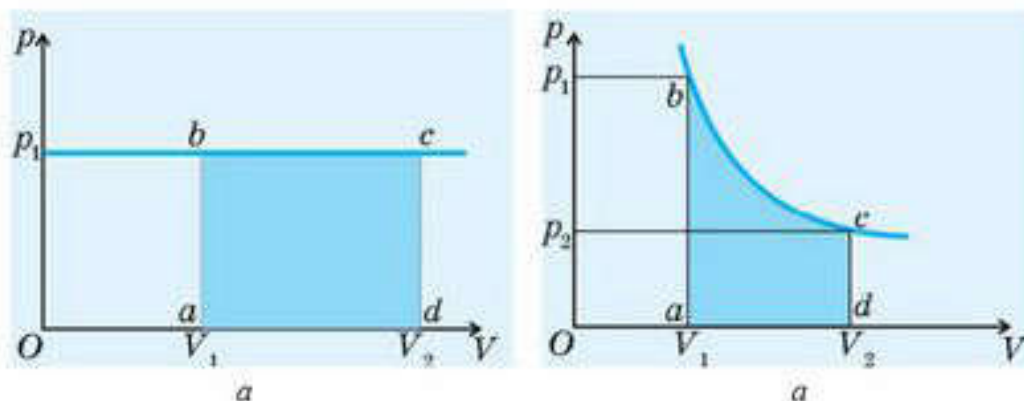


Рис. 20.2



Рис. 20.3

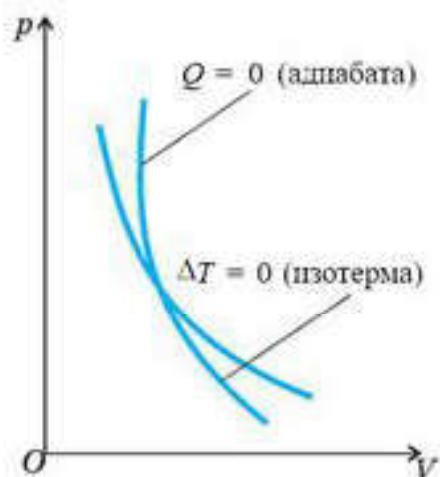


Рис. 20.4

Так как работа внешних сил при сжатии положительна, внутренняя энергия газа при адиабатном сжатии увеличивается, его температура повышается.

При адиабатном расширении газ совершает работу A' за счет уменьшения своей внутренней энергии:

$$\Delta U = - A', \quad (20.6)$$

поэтому температура газа при адиабатном расширении понижается. Это можно обнаружить в следующем опыте. Если в бутылку, содержащую насыщенный водяной пар, накачивать с помощью насоса воздух, то пробка вылетает (рис. 20.3). Работа A' по выталкиванию пробки совершается воздухом за счет уменьшения его внутренней энергии, так как расширение воздуха происходит за очень короткое время и теплообмен с окружающей средой не успевает произойти. Образование капель тумана доказывает, что при адиабатном расширении воздуха его температура понизилась и опустилась ниже точки росы.

График адиабатного процесса. Поскольку при адиабатном сжатии температура газа повышается, то давление газа с уменьшением объема растет быстрее, чем при изотермическом процессе. Понижение температуры газа при адиабатном расширении приводит к тому, что давление газа убывает быстрее, чем при изотермическом расширении. График адиабатного процесса в координатных осях p , V представлен на рисунке 20.4. На том же рисунке для сравнения приведен график изотермического процесса.

Мы рассмотрели различные термодинамические процессы расширения или сжатия идеального газа, к которым применим и абсолютно точно выполняется первый закон термодинамики. Полученные закономерности справедливы и к любым другим термодинамическим системам, в которых такие процессы могут происходить.

Вопросы для самоконтроля

1. Как изменяется внутренняя энергия идеального газа при изотермическом процессе? Почему?
2. Выполняется ли работа газом при изохорном изменении его состояния?
3. Какова связь между изменением внутренней энергии идеального газа и переданным ему количеством теплоты при изохорном процессе?
4. Запишите уравнение первого закона термодинамики для изобарного процесса изменения состояния газа.
5. Как изменяется внутренняя энергия идеального газа при изобарном сжатии?
6. Как найти работу, совершаемую газом при изобарном расширении?
7. Как графически выражается работа, совершаемая газом против внешних сил при изобарном расширении? Сжатии?
- *8. Как графически выразить работу газа при изотермическом расширении? При изотермическом сжатии газа внешними силами?
- *9. Начальное состояние газа характеризуется параметрами p_1 и V_1 . При каком расширении — изотермическом или изобарном — до объема V_2 газ совершает большую работу?
10. Расскажите об адиабатном процессе.

Что освоили по этой теме?

Насколько полезна и интересна была для вас полученная информация?	Что еще вы хотели бы узнать по данной теме?	Какие вопросы возникли у вас в ходе изучения темы?

§ 21. Необратимость тепловых процессов в природе. Второй закон термодинамики

Ключевые понятия: обратимые и необратимые процессы, второй закон термодинамики.

На этом уроке вы:

научитесь объяснять тепловые процессы с помощью первого и второго законов термодинамики.

Как уже было сказано, *первый закон термодинамики* — это закон превращения и сохранения энергии, распространенный на тепловые явления. Он показывает, от каких причин зависит изменение внутренней энергии. Суть этого закона заключается и в утверждении, что изменение внутренней энергии не зависит от процесса или способа, а определяется только начальным и конечным состояниями системы.

Однако наблюдения и опыты показывают, что первый закон термодинамики, будучи необходимым условием, еще не является достаточным условием всякого процесса. Он не дает никаких указаний относительно того, какие энергетические превращения возможны, в каком направлении могут протекать термодинамические процессы, подтверждающие

закон сохранения энергии. С точки зрения первого закона термодинамики возможен любой процесс, в котором количество энергии оставалось бы неизменным. Большое же число опытных фактов накладывает ограничения на возможные направления энергетических превращений в макроскопических системах. Поясним это примерами.

Приведем в тепловой контакт два тела с разными температурами T_1 и T_2 . Система тел будет стремиться к тепловому равновесию при теплообмене, который происходит так, что часть энергии передается от более нагретого тела к менее нагретому. Но первый закон не был бы нарушен, если бы происходила передача теплоты от тела с низкой температурой (холодного тела) к телу с более высокой температурой (горячему телу) при условии, что полная внутренняя энергия оставалась бы неизменной. Однако повседневный опыт показывает, что никогда не происходит процесс самопроизвольного перехода энергии от менее нагретого тела к более нагретому, хотя первому закону термодинамики этот процесс не противоречит. На самом деле теплота самопроизвольно может передаваться только в одном направлении — от горячих тел к холодным.

Еще один пример. В случае падения камня с некоторой высоты на землю вся кинетическая энергия его движения превращается во внутреннюю энергию камня и окружающих его тел в полном соответствии с законом сохранения энергии. Но первому закону термодинамики не противоречил бы и обратный процесс, при котором к лежащему на земле камню передалось бы от окружающих тел некоторое количество теплоты, в результате чего камень поднялся бы на прежнюю высоту. Однако никто никогда не наблюдал самопроизвольно подскакивающих камней.

Эти и другие подобные примеры (передача теплоты от горячего тела к холодному, превращение механической энергии во внутреннюю, расширение газа в вакуум и др.) свидетельствуют о том, что для обратных превращений внутренней энергии в другие виды существуют определенные ограничения. Они заключаются в том, что *внутренняя энергия ни при каких условиях не может целиком превратиться в другие виды энергии.*

С этим и связано направление протекания процессов в природе. Все процессы в природе протекают только в одном направлении. В обратном направлении самопроизвольно они протекать не могут, т. е. *все процессы в природе необратимы.*

Необратимым процессом может быть назван такой процесс, который не допускает возможности самопроизвольного возвращения системы в первоначальное состояние без каких-либо изменений в окружающей среде.

Примерами необратимых процессов являются все рассмотренные выше процессы в идеальном газе: изотермический, изохорный, изобарный и адиабатный. Это прежде всего процесс теплопередачи. Расширение газа также необратимый процесс — обратный процесс самопроизвольного сжатия невозможен. Все реальные процессы в природе и технике, протекающие с трением, являются необратимыми процессами.

Утверждение о необратимости естественных процессов в природе, указывающее направление этих процессов и налагающее ограничения на возможные направления превращения энергии, представляет собой важный фундаментальный закон природы. Он получил название *второй закон термодинамики*.

Этот закон представляет собой обобщение большого числа опытных фактов и принимается как постулат. В связи с тем, что второй закон термодинамики непосредственно связан с необратимостью тепловых процессов в природе, он формулируется следующим образом: **невозможен процесс, единственным результатом которого была бы передача энергии путем теплообмена от холодного тела к горячему.**

В такой формулировке этот закон впервые был высказан немецким ученым Р. Клаузиусом.

Существует несколько классических формулировок второго закона термодинамики. Другая формулировка принадлежит английскому ученому У. Кельвину (1851 г.). Поскольку этот закон накладывает ограничения на превращение внутренней энергии в механическую, то закон гласит: *Невозможно построить такую периодически действующую тепловую машину, которая преобразовывала бы в механическую работу все количество теплоты, полученное от источника энергии — нагревателя.* Такая гипотетическая машина получила название *вечного двигателя второго рода (perpetuum mobile II)*, так как он мог бы работать бесконечно долго, непрерывно за счет почти безграничных запасов энергии. Однако второй закон термодинамики запрещает возможность создания такой машины, поэтому второй закон термодинамики часто формулируют так: *вечный двигатель второго рода невозможен.*



Рудольф Юлиус
Эмануэль Клаузиус
(1822—1888)

Вопросы для самоконтроля

1. В чем суть первого закона термодинамики? Можно ли на его основе определить направленность термодинамических процессов?
2. Какие процессы являются необратимыми?
- *3. Приведите примеры обратимых и необратимых процессов. Объясните их.
4. Что такое *вечный двигатель второго рода*?

5. Приведите формулировки второго закона термодинамики.
6. В чем физический смысл второго закона термодинамики?

Что освоили по этой теме?

Насколько полезна и интересна была для вас полученная информация?	Что еще вы хотели бы узнать по данной теме?	Какие вопросы возникли у вас в ходе изучения темы?

§ 22. Тепловые двигатели

Ключевые понятия: тепловой двигатель, циклический процесс, КПД теплового двигателя, цикл Карно.

На этом уроке вы:

ознакомитесь с принципом работы теплового двигателя; узнаете, что такое *тепловой двигатель Карно*; узнаете, что КПД теплового двигателя определяется только температурами нагревателя и холодильника; научитесь рассчитывать КПД теплового двигателя.

Второй закон термодинамики играет основополагающую роль в теории *тепловых машин*. *Тепловыми машинами, или тепловыми двигателями называют устройства, превращающие определенную часть внутренней энергии системы в механическую и за счет нее совершающие работу.*

К тепловым машинам относятся паровые машины и турбины, двигатели внутреннего сгорания, реактивные двигатели. Все они составляют три вида тепловых двигателей, используемых в современной технике: *турбинные, поршневые и реактивные*. Так, на транспорте и в сельском хозяйстве применяют поршневые двигатели внутреннего сгорания. В самолетах, на морских судах, локомотивах используют газовые турбины. Паровые турбины являются ведущими двигателями на тепловых электростанциях. Реактивные двигатели используют в ракетах, самолетах.

Из курса физики для 8 класса вы знаете, что каждая тепловая машина для совершения работы должна иметь три основные части: *нагреватель, рабочее тело и холодильник*. Рабочим телом у всех тепловых двигателей является газ (пар), который, расширяясь при нагревании, совершает работу — приводит во вращение вал турбины, движет поршень и т. д. Газ, или пар, нагревается до высокой температуры T_1 за счет сгорания топлива внутри самого двигателя. Температуру T_1 называют *температурой нагревателя*. Получив от нагревателя некоторое количество теплоты Q_1 , рабочее тело превращает часть его в механическую энергию, совершая при этом работу A' . По мере соверше-

ния работы газ теряет энергию, отдавая оставшееся количество теплоты Q_2 холодильнику и охлаждаясь до некоторой температуры T_2 . Эта температура T_2 , несколько **большая** температуры окружающей среды, называется **температурой холодильника**. Холодильниками являются как атмосфера, так и другие специальные охлаждающие устройства. Таким образом, в двигателе рабочее тело при расширении не может отдать всю свою внутреннюю энергию на совершение работы, так как часть этой энергии, передаваясь холодильнику, безвозвратно теряется. Именно об этом свидетельствует второй закон термодинамики в формулировке Кельвина.

Для того чтобы газ мог выполнять работу и далее, его сжимают, приводя в исходное состояние с большей внутренней энергией. После этого вновь могут происходить процессы расширения и сжатия газа. Такую совокупность изменений состояния газа, в результате которых он возвращается в исходное состояние, называют **периодически повторяющимся, или круговым, циклом (процессом)**.

На рисунке 22.1 в системе координат p, V графически изображены процессы изотермического расширения газа (линия AB) и адиабатного расширения (линия BC) до объема V_2 и давления p_2 и затем сжатия его до первоначального объема V_1 (линии CD и DA). Газ при расширении выполняет положительную работу A (так как $\Delta V > 0$), численно равную площади фигуры $ABV_2'V_1$. Работа газа при сжатии отрицательна (так как $\Delta V < 0$) и численно равна площади фигуры $CDV_1'V_2$. Полезная работа за этот цикл численно равна разности площадей, заключенных между кривыми AB и CD (на рис. 22.1 закрашено).

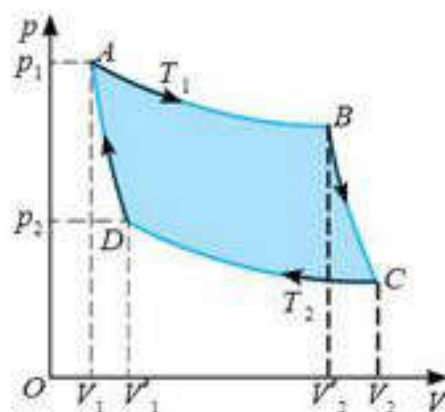


Рис. 22.1

Итак, чтобы получить полезную механическую работу при циклическом процессе, температура рабочего тела (газа) при его расширении должна быть выше, чем при его сжатии. Это значит, что газ должен получить от нагревателя количество теплоты Q_1 большее, чем количество теплоты Q_2 , отданное холодильнику при сжатии.

На совершение работы идет не все количество теплоты Q_1 , полученное от нагревателя. Так как часть количества теплоты Q_2 отдается холодильнику, то полезная работа равна разности количеств теплоты, подведенной при расширении газа и отведенной при его сжатии:

$$A' = Q_1 - Q_2. \quad (22.1)$$

На рисунке 22.2 изображена принципиальная схема теплового двигателя.

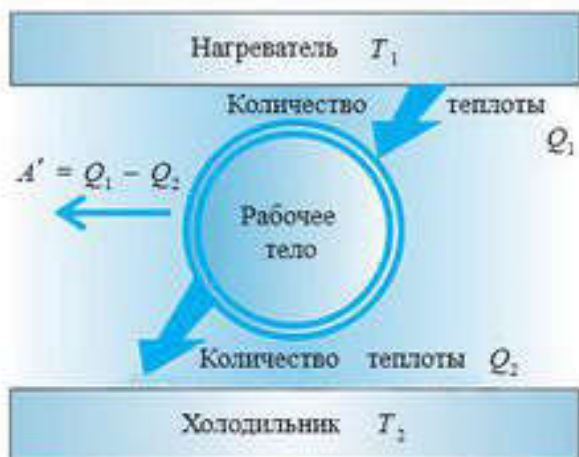


Рис. 22.2

Для характеристики эффективности цикла, а, следовательно, и тепловой машины по превращению внутренней энергии в механическую, вводится *коэффициент полезного действия* машины (КПД).

В 1824 г. французский инженер, физик, один из основателей термодинамики Никола Карно показал, что максимально возможный КПД тепловой машины определяется формулой:

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \cdot 100\%. \quad (22.2)$$

Коэффициент полезного действия теплового двигателя равен отношению работы $A = Q_1 - Q_2$, совершаемой двигателем, к количеству теплоты Q_1 , полученному от нагревателя.

Поскольку в реальных условиях измерить Q_1 и Q_2 практически невозможно, формула (22.1) имеет только теоретическое значение.

Карно рассмотрел идеальный термодинамический цикл и доказал теорему, впоследствии названную его именем — *цикл Карно* — обратимый круговой процесс, состоящий из двух изотермических и двух адиабатных процессов. Ученый доказал, что для идеального двигателя, в котором не учитываются тепловые потери, кроме Q_2 , КПД зависит только от температур нагревателя T_1 и холодильника T_2 и может быть подсчитан по формуле

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}. \quad (22.3)$$

Из формулы (22.3) следует, что КПД идеальной тепловой машины можно увеличить, если максимально повысить температуру T_1 нагревателя и понизить температуру T_2 холодильника. В этом направлении и проводилось совершенствование тепловых двигателей. У реально существующих тепловых двигателей КПД значительно меньше максимально возможного.

Несколько типов тепловых машин, их КПД, приблизительные значения температур, которые могут быть приняты как температуры нагревателя и холодильника, указаны в таблице 22.1. Из таблицы

видно, что КПД реальных машин гораздо ниже, чем значения КПД идеальных машин.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие машины называют *тепловыми*? Приведите примеры тепловых машин.
2. Какие примеры из повседневной жизни, иллюстрирующие превращение механической энергии во внутреннюю, вы можете привести?
3. Назовите основные части любого теплового двигателя. Какова принципиальная схема работы двигателей?
4. Что называют *круговым процессом*, или *циклом*?
5. Из каких процессов состоит цикл Карно?
- *6. Можно ли осуществить цикл, при котором все подведенное к рабочему телу количество теплоты превращалось бы в механическую энергию?
7. Что понимают под *КПД тепловой машины*?
8. Чему равен максимальный КПД тепловой машины?
9. Укажите пути повышения КПД тепловых машин.
- *10. Почему паровые машины вытеснены двигателями внутреннего сгорания?
- *11. В чем преимущество дизельного двигателя по сравнению с карбюраторным (табл. 22.1)?

Таблица 22.1

Тепловая машина	Рабочее тело	Температура нагревателя T_1 , К	Температура холодильника T_2 , К	КПД η_{\max} , %	КПД машины, %
Поршневая паровая машина	Пар	480	300	37	7—15
Паровая турбина	Пар	850	380	55	20—25
Дизель	Продукты сгорания топлива	2100	380	82	30—39
Карбюраторный двигатель	Продукты сгорания топлива	2100	380	82	18—24

Что освоили по этой теме?

Насколько полезна и интересна была для вас полученная информация?	Что еще вы хотели бы узнать по данной теме?	Какие вопросы возникли у вас в ходе изучения темы?

§ 23. Роль тепловых двигателей и охрана окружающей среды

Ключевые понятия: загрязнение среды, парниковый эффект.

На этом уроке вы:

узнаете об экологических проблемах, порождаемых использованием тепловых двигателей.

Значение тепловых двигателей в сельском хозяйстве исключительно велико. Особо широко используются тепловые двигатели на тепловых электростанциях, которые обеспечивают развитие всех отраслей народного хозяйства. Так, на тепловых электростанциях, где в основном используются мощные паровые и газовые турбины, вырабатывается около 80—85% всей электрической энергии, используемой человечеством.

Невозможно представить современный транспорт без тепловых двигателей, пока равноценной замены им нет. По железнодорожным магистралям водят составы мощные тепловозы с дизельными установками и электровозы, по водным путям — теплоходы. Миллионы автомобилей с двигателями внутреннего сгорания перевозят пассажиров и грузы. В авиации на самолетах и вертолетах устанавливают поршневые двигатели, а огромные лайнеры снабжены турбовинтовыми и турбореактивными двигателями. С помощью ракетных двигателей осуществляются запуски искусственных спутников, космических ракет, кораблей и станций. Широко используются двигатели внутреннего сгорания для механизации производственных процессов в сельском хозяйстве. Их устанавливают на тракторах, комбайнах, насосных станциях и т. д. Без тепловых двигателей современная цивилизация немыслима.

В то же время, решая задачи экономики, нельзя забывать об отрицательном влиянии тепловых двигателей на окружающую среду, на условия существования человека на Земле. Неуклонный рост энергетических мощностей, развитие различных видов транспорта, возрастание потребления угля, нефти, газа в промышленности приводят к тому, что все более сложной проблемой становится охрана природы от вредного влияния продуктов сгорания как в отдельных районах земного шара, так и в масштабах всей планеты. Особое беспокойство вызывает загрязнение водоемов и атмосферы. Отрицательное влияние тепловых машин на окружающую среду связано с действием различных факторов.

При сжигании топлива в тепловых машинах расходуется большое количество кислорода из атмосферы, в результате чего постепенно уменьшается его содержание в воздухе. На сгорание разнообразного топлива расходуется от 10 до 25% кислорода, производимого зеле-

ными растениями. Только один реактивный лайнер за 5 ч полета потребляет 45 т кислорода.

Тепловые машины не только сжигают кислород, но и выбрасывают в атмосферу эквивалентное количество углекислого газа (оксида углерода). В настоящее время ежегодно за счет сжигания топлива в атмосферу Земли поступает дополнительно около 200 млн. т углекислого газа, что приводит к повышению его концентрации в атмосфере. Способность молекул оксида углерода поглощать инфракрасное (тепловое) излучение Земли может привести к повышению температуры атмосферы при дальнейшем увеличении концентрации в ней углекислого газа, что вызовет *парниковый эффект*.

Поскольку все виды топлива в топках промышленных предприятий, тепловых электростанций, в тепловых двигателях не сгорают полностью, то происходит загрязнение атмосферы золой, хлопьями сажи, оксида серы и другими отработанными газами. Выбрасываемые в атмосферу токсические продукты горения оказывают вредное воздействие на животный и растительный мир. Сейчас во всем мире обычные энергетические установки ежегодно выбрасывают в атмосферу 150 млн. т оксида серы (IV), около 50 млн. т оксида азота (II), 70 млн. м³ соединений свинца и других металлов. Особую опасность в загрязнении атмосферы представляют автомобили, число которых угрожающе растет.

Некоторые соединения (CO_2 , SO_2 , H_2S и др.), содержащиеся в продуктах неполного сгорания, вступают в химические реакции с водяными парами, присутствующими в атмосфере. В виде мельчайших капелек растворов кислот они переносятся на большие расстояния и затем выпадают на поверхность Земли в виде так называемых *кислотных дождей*. Кислотные дожди оказывают пагубное воздействие на людей, животных, растения, почву, водоемы, сооружения и т. д.

Во всех странах мира с развитой промышленностью в последнее время большое внимание уделяется охране окружающей среды. В этой связи ведутся работы, направленные на снижение и полную ликвидацию загрязнений воздуха. Основные усилия направлены на предупреждение выбросов загрязнений в атмосферу. Для этого осуществляются мероприятия по обеспечению более полного сгорания топлива и тщательной очистки выделяющихся газов, а также поиску более чистого топлива.

Максимальное сгорание топлива возможно, если в горячую смесь двигателей внутреннего сгорания добавить водород. Но наиболее перспективной считается возможность применения в качестве топлива водорода, так как продуктом сгорания в водородном двигателе является обычная вода.

Интенсивные работы ведутся по снижению загрязнений воздуха выхлопными и топочными газами. Для этой цели на двигателях устанавливают специальные фильтры, катализаторы. На всех действующих теплоцентралях и тепловых электростанциях устанавливают газоочистное и пылеулавливающее оборудование. Принимаются меры по рациональному размещению тепловых электростанций, их выносят за городскую черту, создают вокруг них зеленые зоны.

Каждый человек должен участвовать в защите окружающей среды, и его посильное участие заключается в элементарном — экономии энергии на производстве и в быту. Все мы должны помнить, что нельзя оставлять невыключенными электроприборы, допускать бесполезные потери при обогреве помещений и т. д.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие области применения тепловых двигателей вы можете назвать? Приведите примеры.
2. В чем заключается отрицательное влияние тепловых двигателей на окружающую среду и человека?
3. Чем опасен перегрев атмосферы при работе тепловых машин?
- *4. Каковы пути решения экологической проблемы, связанной с использованием тепловых машин?

Примеры решения задач

1. Для получения газированной воды через воду пропускают сжатый углекислый газ. Почему температура воды при этом понижается?

Решение. Расширение пузырьков углекислого газа в воде можно считать приближенно адиабатным процессом. Поэтому первое начало термодинамики для отдельного пузырька имеет вид:

$$0 = \Delta U + p\Delta V,$$

и показывает, что внутренняя энергия, а значит, и температура газа, при увеличении объема пузырька уменьшаются.

2. Температура нагревателя идеальной тепловой машины 117°C , а холодильника 27°C . Количество теплоты, получаемое машиной от нагревателя за 1 с, равно 60кДж . Вычислить КПД машины, количество теплоты, отдаваемое холодильнику в 1 с, и мощность машины.

Решение. КПД идеальной тепловой машины максимален и равен КПД цикла Карно:

$$\eta = \eta_{\text{к}} = 1 - \frac{T_2}{T_1},$$

где T_1 и T_2 — температуры нагревателя и холодильника, соответственно. Поскольку КПД тепловой машины связан с количеством теплоты Q_1 ,

полученным от нагревателя, и количеством теплоты Q_2 , отдаваемым холодильнику, формулой:

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1},$$

то количество теплоты, отдаваемое холодильнику в 1 с, определяется соотношением:

$$Q_2 = Q_1(1 - \eta),$$

где Q_1 — количество теплоты, получаемое в 1 с от нагревателя. Мощность N машины равна работе A , совершенной рабочим телом за 1 с. Для идеальной тепловой машины: $N = A = Q_1 - Q_2$.

Вычисления: $\eta = 1 - \frac{300\text{K}}{390\text{K}} \approx 0,23$; $Q_2 = 60 \text{ кДж} \cdot 0,77 \approx 46 \text{ кДж}$;
 $N \approx 14 \text{ кДж/с} = 14 \text{ кВт}$.

Ответ : 0,23; 46 кДж; 14 кВт.

Упражнение 9

1. Запишите уравнение первого закона термодинамики для адиабатного процесса изменения состояния газа и проанализируйте его.
2. Используя материал параграфа, перепишите и заполните таблицу 23.1, характеризующую применение первого закона термодинамики к процессам изменения состояния идеального газа.

Таблица 23.1

Процесс изменения состояния газа	Полученное количество теплоты, Q	Совершенная работа, A	Изменение внутренней энергии, U	Запись первого закона термодинамики для каждого процесса	Формулировка первого закона термодинамики
Изотермическое расширение, T					
Изохорное нагревание, V					
Изобарное расширение, p					
Адиабатное расширение					

3. Почему невозможно построить тепловой двигатель без холодильника?
4. В воде морей и океанов, воздухе атмосферы заключена огромная внутренняя энергия. Как можно было бы ее использовать?
5. Подсчитайте КПД идеального теплового двигателя для случаев, когда температура нагревателя и холодильника соответственно равна: а) 600°C и 40°C ; б) 200°C и 15°C .

Что освоили по этой теме?

Насколько полезна и интересна была для вас полученная информация?	Что еще вы хотели бы узнать по данной теме?	Какие вопросы возникли у вас в ходе изучения темы?
---	---	--

§ 24. Влажность воздуха, точка росы

Ключевые понятия: насыщенный пар, ненасыщенный пар, свойства насыщенных паров, свойства ненасыщенных паров, относительная влажность воздуха, абсолютная влажность воздуха, точка росы.

На этом уроке вы:

познакомитесь с насыщенным и ненасыщенным парами, с их свойствами, абсолютной и относительной влажностью; научитесь описывать принципы действия волосного и конденсационного гигрометров, определять относительную влажность воздуха с помощью гигрометра и психрометра, применять формулу для нахождения относительной влажности.

Насыщенные и ненасыщенные пары. Когда свободная поверхность жидкости в сосуде граничит с атмосферой, то испарение преобладает над конденсацией и уровень жидкости с течением времени понижается. Происходит это потому, что движущийся воздух уносит пар и уменьшает его плотность над поверхностью жидкости.

Опыт показывает, что уровень жидкости в герметически закрытом сосуде со временем не меняется. Это означает, что в таком сосуде процесс испарения жидкости полностью компенсируется с конденсацией пара, т. е. сколько молекул вылетает из жидкости, столько же в нее возвращается. Иначе говоря, в этом случае число молекул как в жидкости, так и в паре над ней остается неизменным, хотя между жидкостью и паром происходит непрерывный обмен молекулами. Такое равновесие между жидкостью и ее паром называют *динамическим*.

Пар, который находится в состоянии динамического равновесия со своей жидкостью, называется паром, насыщающим пространство, или насыщенным паром. Пар, который находится над поверхностью жидкости, когда испарение преобладает над конденсацией, и пар при отсутствии жидкости называется ненасыщенным паром.

Чтобы проверить, зависят ли плотность и давление насыщенного пара от рода вещества, проведем такой опыт. Возьмем одинаковые закрытые колбы с водой, спиртом и эфиром, соединенные с манометрами (рис. 24.1). Кроме воздуха, давление в колбах будут создавать и

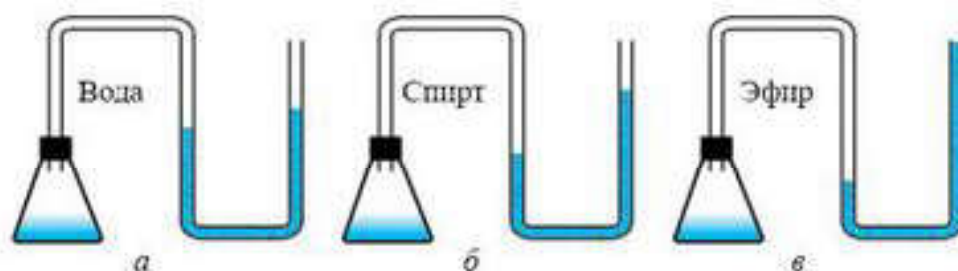


Рис. 24.1

насыщенные пары налитых жидкостей. Оказывается, что наибольшее давление будет в колбе с эфиром, а наименьшее — в колбе с водой, т. е. большее давление создает насыщенный пар той жидкости, которая быстрее испаряется. Такого рода опыты показали следующее: *чем меньше удельная теплота парообразования жидкости, тем быстрее она испаряется и тем больше давление и концентрация ее паров, насыщающих пространство (при одинаковой температуре различных жидкостей)*.

Относительная влажность воздуха. Величина, характеризующая содержание водяных паров в различных частях атмосферы Земли, называется *влажностью воздуха*. Для количественной оценки влажности воздуха используют *абсолютную* или *относительную влажность*. Абсолютную влажность воздуха измеряют плотностью водяного пара ρ_a , находящегося в воздухе, или его давлением p_a . Более ясное представление о степени влажности воздуха дает относительная влажность ϕ , которую измеряют числом, показывающим, сколько процентов составляет абсолютная влажность ρ_a от плотности водяного пара ρ_n , нужной для насыщения воздуха при имеющейся у него температуре:

$$\phi = \frac{\rho_a}{\rho_n} \cdot 100\%. \quad (24.1)$$

Таким образом, относительная влажность определяется не только абсолютной влажностью, но и температурой воздуха. При вычислении относительной влажности значения ρ_a и ρ_n надо брать из таблиц.

Температура, при которой воздух в процессе своего охлаждения становится насыщенным водяными парами, называется точкой росы. При известной точке росы абсолютную влажность воздуха ρ_a можно найти по таблице, так как она равна плотности насыщенного пара ρ_n при точке росы. Найдя затем по этой же таблице ρ_n для данной температуры воздуха, можно по формуле (24.1) вычислить относительную влажность ϕ .

Большинство приборов для определения влажности воздуха называются *гигрометрами* (от греч. *гигрос* — “влажный”) и *психрометрами* (от греч. *психриа* — “холод”).

Различают *гигрометры волосной* (рис. 24.2) и *конденсационный* (рис. 24.3). Принцип действия первого основан на свойстве человеческого (конского) волоса удлиняться при повышении влажности окружающего воздуха. С удлинением волоса меняется угол отклонения стрелки прибора. Действие второго основано на определении точки росы, по которой находят в таблицах абсолютную влажность. Нагнетая в коробку с налитым в нее эфиром с помощью груши воздух,



Рис. 24.2



Рис. 24.3

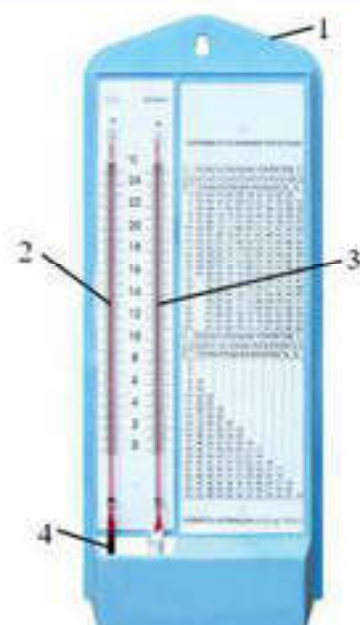


Рис. 24.4

добиваются усиленного испарения эфира. Это приводит к охлаждению самой коробки и ее лщевой отполированной металлической поверхности, на которой будет конденсироваться водяной пар, находящийся в окружающем воздухе. С помощью термометра, укрепленного на корпусе гигрометра, замечают температуру окружающего воздуха и температуру появления росы. Потом по таблице зависимости давления насыщенного водяного пара от температуры находят давления, соответствующие этим температурам. Затем по формуле (24.1) вычисляют относительную влажность воздуха.

Психрометр (рис. 24.4) состоит из корпуса 1, на котором закреплены два термометра: сухой 2 и влажный 3; к корпусу прикреплен сосуд с водой 4. Шарик термометра 3 обмотан тканью, конец которой опущен в сосуд с водой. Вода, испаряясь, охлаждает термометр 3. По разности температур термометров с помощью психрометрических таблиц находят относительную влажность воздуха.

Вопросы для самоконтроля

1. Что понимают под *насыщенными* и *ненасыщенными парами* ?
2. Каковы свойства насыщенных паров?
3. Подчиняются ли насыщенные пары законам идеального газа? Объясните.
4. В чем особенность ненасыщенных паров?
5. Что такое *абсолютная* и *относительная влажность воздуха* ?
- *6. Как работают гигрометр и психрометр?

Что освоили по этой теме?

Насколько полезна и интересна была для вас полученная информация?	Что еще вы хотели бы узнать по данной теме?	Какие вопросы возникли у вас в ходе изучения темы?
---	---	--

§ 25. Поверхностное натяжение жидкости

Ключевые понятия: поверхностный слой жидкости, поверхностное натяжение, сила поверхностного натяжения.

На этом уроке вы:

научитесь объяснять природу поверхностного натяжения жидкости.

Поверхностный слой жидкости. Выясним, чем отличаются действия молекулярных сил внутри жидкости и на ее поверхности. Среднее значение равнодействующих молекулярных сил притяжения, приложенных к молекуле M_1 , которая находится внутри жидкости (рис. 25.1), близко к нулю. Случайные флуктуации этой равнодействующей заставляют молекулу M_1 совершать лишь хаотическое движение внутри жидкости. Несколько иначе обстоит дело с молекулами M_2 и M_3 , находящимися в поверхностном слое жидкости.

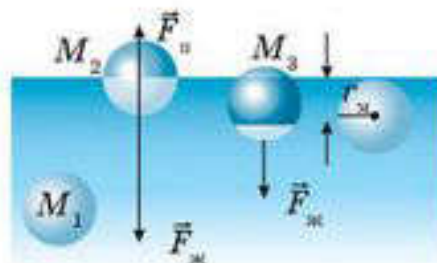


Рис. 25.1

Опишем вокруг молекул *сферы молекулярного действия* радиусом $r_{\text{ж}}$ (порядка 10^{-9} м). Тогда для молекулы M_2 в нижней полусфере окажется много молекул, а в верхней — значительно меньше, так как снизу находится жидкость, а сверху — пар и воздух. Поэтому для молекулы M_2 равнодействующая молекулярных сил притяжения в нижней полусфере $F_{\text{ж}}$ много больше равнодействующей молекулярных сил в верхней полусфере $F_{\text{н}}$. Отметим, что сила $F_{\text{н}}$ так мала, что ею можно пренебречь. Равнодействующая молекулярных сил притяжения, приложенных к молекуле M_3 , меньше, чем для молекулы M_2 , так как определяется только действием молекул в темно-синей области. Существенно, что равнодействующие для молекул M_2 и M_3 направлены внутрь жидкости перпендикулярно ее поверхности.

Таким образом, все молекулы жидкости, находящиеся в поверхностном слое, толщиной, равной радиусу молекулярного действия (рис. 25.1), втягиваются внутрь жидкости. Но пространство внутри жидкости занято другими молекулами, поэтому поверхностный слой создает давление на жидкость, которое называют *молекулярным давлением*.

Теоретические расчеты показали, что молекулярное давление очень велико. Например, для воды оно порядка $11 \cdot 10^8$ Па, для эфира — $1,4 \cdot 10^8$ Па.

Поверхностное натяжение. Поскольку молекулы жидкости, находящиеся в ее поверхностном слое, втягиваются внутрь жидкости, их потенциальная энергия больше, чем у молекул внутри жидкости. К этому выводу можно также прийти, если вспомнить, что потенциальная энергия взаимодействия молекул отрицательна, и учесть, что молекулы

в поверхностном слое жидкости взаимодействуют с меньшим числом молекул, чем молекулы внутри жидкости.

Эту дополнительную потенциальную энергию молекул поверхностного слоя жидкости называют *поверхностной энергией*. За счет нее может быть произведена работа, связанная с изменениями свободной поверхности жидкости. Наоборот, для того, чтобы вывести молекулы, находящиеся внутри жидкости, на ее поверхность, нужно преодолеть противодействие молекулярных сил, т. е. произвести работу, которая нужна для увеличения поверхностной энергии ΔE прямо пропорционально изменению площади свободной поверхности жидкости ΔS :

$$\Delta E = \sigma \Delta S. \quad (25.1)$$

Тогда $\Delta E = A$, то имеем

$$A = \sigma \Delta S. \quad (25.2)$$

Итак, работа молекулярных сил A при уменьшении площади свободной поверхности прямо пропорциональна ΔS . Но эта работа должна еще зависеть от рода жидкости и внешних условий, например, от температуры. Эту зависимость и выражает коэффициент σ .

Величина σ , характеризующая зависимость работы молекулярных сил при изменении площади свободной поверхности жидкости от рода жидкости и внешних условий, называется *коэффициентом поверхностного натяжения жидкости* (или просто *поверхностным натяжением*); он показывает, какую работу должны совершить молекулярные силы, чтобы уменьшить площадь свободной поверхности жидкости на единицу:

$$\sigma = \frac{A}{\Delta S}. \quad (25.3)$$

Выведем единицу измерения поверхностного натяжения σ в СИ:

$$\sigma = 1 \text{ Дж/1 м}^2 = 1 \text{ Н/м.}$$

Так как всякая система самопроизвольно переходит в состояние, при котором ее потенциальная энергия минимальна, то жидкость должна самопроизвольно переходить в такое состояние, при котором площадь ее свободной поверхности имеет наименьшее значение. Это можно показать с помощью следующего опыта.

На проволоке, изогнутой в виде буквы П, укрепляют подвижную перемычку AB (рис. 25.2, a). Полученную таким образом рамку затягивают мыльной пленкой, опуская рамку в мыльный раствор. После вынимания рамки из раствора перемычка AB перемещается вверх, т. е. молекулярные силы действительно уменьшают площадь свободной поверхности жидкости. Поскольку при одном и том же объеме наименьшая площадь поверхности имеется у шара, жидкость в состоянии

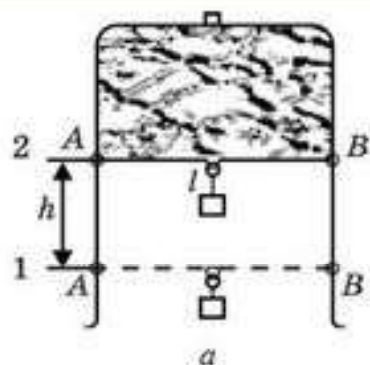


Рис. 25.2

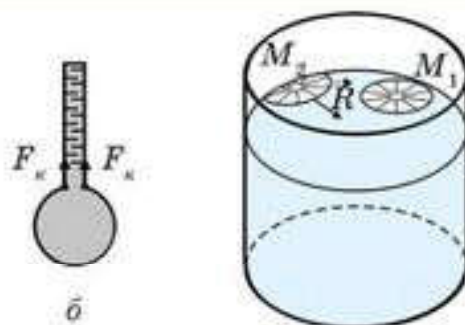


Рис. 25.3

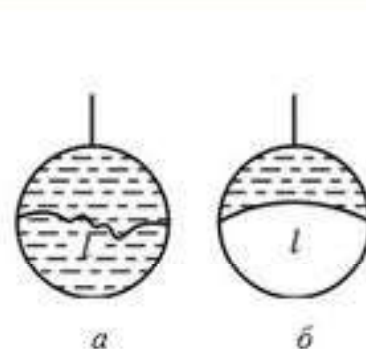


Рис. 25.4

невесомости принимает его форму. По этой же причине маленькие капли жидкости имеют шарообразную форму.

Сила поверхностного натяжения. Молекула M_1 , которая расположена на поверхности жидкости (рис. 25.3), взаимодействует не только с молекулами, находящимися внутри жидкости, но и с молекулами на поверхности жидкости, расположенными в пределах сферы молекулярного действия. Для молекулы M_1 равнодействующая R молекулярных сил, направленных вдоль поверхности жидкости, равна нулю, а для молекулы M_2 , расположенной у края поверхности, сила R отлична от нуля. Из рисунка 25.3 видно, что сила R направлена по нормали к границе свободной поверхности и по касательной к самой поверхности.

Молекулярные силы, направленные вдоль поверхности жидкости, действуют на любую замкнутую линию на свободной поверхности жидкости по нормали к этой линии таким образом, что стремятся сократить площадь поверхности жидкости, ограниченную замкнутой линией. Это можно показать на следующем опыте.

На проволочном кольце укрепляется нитка длиной l (рис. 25.4, а). Если затянуть кольцо мыльной пленкой, то нитка свободно расположится на этой пленке, так как молекулярные силы будут стремиться сократить площадь поверхности, ограниченную как верхним замкнутым контуром, так и нижним. Порвем мыльную пленку с нижней стороны нитки. Тогда молекулярные силы сократят поверхность, ограниченную верхним контуром, и натянут нитку (рис. 25.4, б).

Сила $F_к$, обусловленная взаимодействием молекул жидкости, вызывающая сокращение площади ее свободной поверхности и направленная по касательной к этой поверхности, называется силой поверхностного натяжения.

Покажем, что сила поверхностного натяжения $F_к$, действующая на перемычку (рис. 25.2, а), пропорциональна ее длине l . Работа, совершаемая силами поверхностного натяжения при перемещении перемычки l из положения 1 в положение 2, выражается формулой $A = \sigma \Delta S$. При этом суммарное сокращение площади ΔS свободной поверхности жидкости равно $2hl$, а так как свободных поверхностей две, то $A = 2\sigma hl$.

С другой стороны, работу A можно найти, умножив силу на путь. Поскольку в нашем примере у поверхности пленки две линии соприкосновения с перемычкой (рис. 25.2, б), то общая сила равна $2F_n$ и $A = 2 F_n h$. Таким образом, $2F_n h = 2 \cdot \sigma hl$, или

$$F_n = \sigma l. \quad (25.4)$$

Тогда

$$\sigma = \frac{F_n}{l}. \quad (25.5)$$

Отсюда следует, что **коэффициент поверхностного натяжения σ определяется силой поверхностного натяжения, действующей на единицу длины границы свободной поверхности жидкости.**

Следует помнить, что $1 \text{ Дж/м}^2 = 1 \text{ Н} \cdot \text{м/м}^2 = 1 \text{ Н/м}$.

Теперь легко понять, почему жидкость принимает форму, при которой площадь ее свободной поверхности оказывается наименьшей: силы молекулярного давления втягивают молекулы с поверхности внутрь жидкости, а силы поверхностного натяжения сокращают площадь свободной поверхности, т. е. закрывают образовавшиеся “окна” на этой поверхности.

Итак, поверхностный слой жидкости всегда находится в состоянии натяжения. Однако это состояние нельзя сравнивать с натяжением упругой растянутой пленки. Упругие силы по мере увеличения площади растянутой пленки возрастают, а силы поверхностного натяжения от площади поверхности не зависят. Сила F_n в положениях 1 и 2 на рисунке 25.4 одинакова, поскольку число молекул в единице площади свободной поверхности жидкости остается одинаковым.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие процессы происходят в поверхностном слое жидкости?
- *2. Что такое *поверхностная энергия* ?
3. Каков физический смысл коэффициента поверхностного натяжения?
4. Что называется *силой поверхностного натяжения* ? Какова ее единица измерения?

Что освоили по этой теме?

Насколько полезна и интересна была для вас полученная информация?	Что еще вы хотели бы узнать по данной теме?	Какие вопросы возникли у вас в ходе изучения темы?

§ 26. Смачивание. Капиллярные явления

Ключевые понятия: смачивающая жидкость, краевой угол, несмачивающая жидкость, лапласовое давление, капиллярность, капиллярные явления.

На этом уроке вы:

познакомитесь со смачивающим и несмачивающим свойствами жидкостей, с капиллярными явлениями и их ролью в природе и технике; научитесь применять формулу, выражающую лапласовое давление при решении задач.

Смачивание. Краевой угол. Если опустить стеклянную палочку в ртуть и затем вынуть ее, то ртути на ней не окажется. Но если эту же палочку опустить в воду, а затем вытащить, на ее конце останется капля воды. Этот опыт показывает, что молекулы ртути притягиваются друг к другу сильнее, чем к молекулам стекла, а молекулы воды притягиваются друг к другу слабее, чем к молекулам стекла.

Если молекулы жидкости притягиваются друг к другу слабее, чем к молекулам твердого вещества, то жидкость называют *смачивающей это вещество*. Например, вода смачивает чистое стекло и не смачивает парафин. Если молекулы жидкости притягиваются друг к другу сильнее, чем к молекулам твердого вещества, то жидкость называют *не смачивающей это вещество*. Ртуть не смачивает стекло, однако она смачивает чистые медь и цинк.

Расположим горизонтально плоскую пластинку из какого-либо твердого вещества и капнем на нее исследуемую жидкость. Тогда капля расположится либо так, как показано на рисунке 26.1, *а*, либо так, как показано на

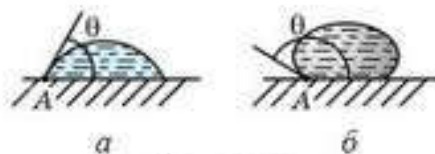


Рис. 26.1

рисунке 26.1, *б*. В первом случае жидкость смачивает твердое вещество, а во втором — нет. Отмеченный на рисунке 26.1 угол θ называют *краевым углом*. Он образуется плоской поверхностью твердого тела и плоскостью, касательной к свободной поверхности жидкости, проходящей через точку *А* (рис. 26.1), где граничат твердое тело, жидкость и газ. Внутри краевого угла всегда находится жидкость. Для смачивающих жидкостей краевой угол острый, а для несмачивающих — тупой. Чтобы действие силы тяжести не искажало краевой угол, каплю надо брать как можно меньше.

Давление, создаваемое искривленной поверхностью жидкости. Искривление поверхности жидкости у краев сосуда легко обнаружить на опыте. Особенно отчетливо это видно в узких трубках, где искривляется вся свободная поверхность жидкости. В трубке с круглым сечением эта поверхность представляет собой часть поверхности сферы и называется *мениском* (от греч. *менискос* — “лунный

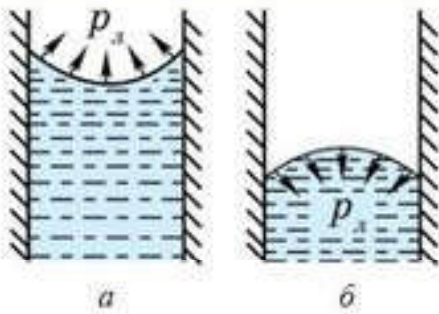


Рис. 26.2

серп”). У смачивающей жидкости мениск вогнутый, а у несмачивающей — выпуклый (рис. 26.2, а, б).

Так как площадь поверхности мениска больше, чем площадь внутреннего сечения трубки, то под действием молекулярных сил искривленная поверхность жидкости стремится выпрямиться и этим создает дополнительное давление p_π , которое при смачивании

(вогнутый мениск) направлено от жидкости, а при несмачивании (выпуклый мениск) — внутрь жидкости. Это давление определил французский ученый (астроном, математик и физик) Пьер Лаплас (1749—1827), поэтому его часто называют *лапласовым давлением*.

Для сферической формы свободной поверхности жидкости с радиусом R это давление выражается формулой:

$$p_\pi = \frac{2\sigma}{R}. \quad (26.1)$$

Капиллярность. Искривление поверхности жидкости в узких трубках приводит к кажущемуся нарушению закона сообщающихся сосудов. Если опустить в воду узкую стеклянную трубку (рис. 26.3, а), то вода втягивается в трубку, и ее уровень устанавливается на высоте h над уровнем воды вне трубки. Объясняется это тем, что лапласово давление p_π в трубке направлено вверх. Оно и втягивает воду вверх до тех пор, пока не окажется уравновешенным гидростатическим давлением p_r столба воды в трубке высотой h , равным $p_r = \rho gh$.

Поскольку $p_\pi = \frac{2\sigma}{R}$, то при $p_\pi = p_r$ имеем $\frac{2\sigma}{R} = \rho gh$, откуда

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g R}. \quad (26.2)$$

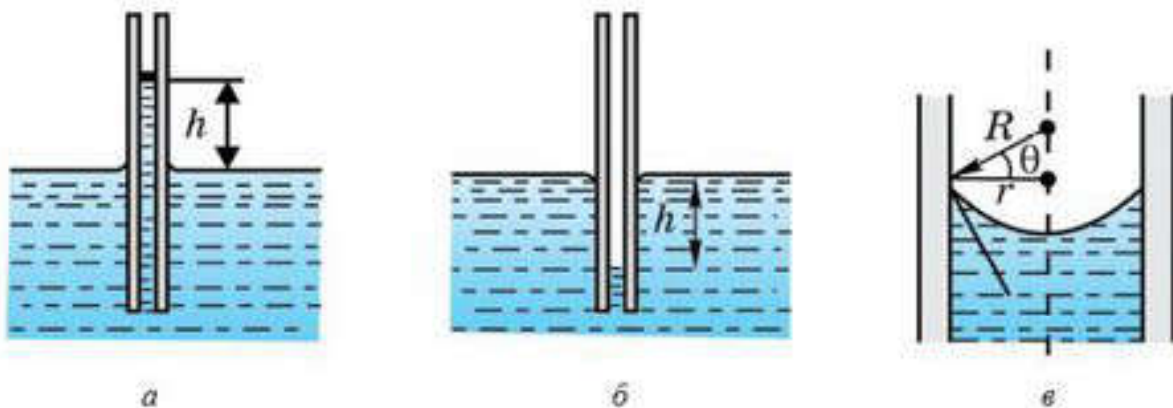


Рис. 26.3

При полном смачивании ($\theta = 0$) мениск в узкой трубке имеет форму полусферы, и радиус сферической поверхности R равен внутреннему радиусу трубки r . Тогда

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g r}. \quad (26.3)$$

При неполном смачивании ($\theta \neq 0$) радиус мениска $R = \frac{r}{\cos \theta}$ (рис. 26.3, *в*) и

$$h = \frac{2\sigma \cdot \cos \theta}{\rho g r}. \quad (26.4)$$

Из формулы (26.4) видно, что высота h тем больше, чем меньше внутренний радиус трубки r . Подъем воды особенно значителен в трубках, внутренний диаметр которых соизмерим с диаметром волоса (или еще меньше); поэтому такие трубки называют *капиллярами* (от греч. *капиллярис* — “волосной, тонкий”). Смачивающая жидкость в капиллярах поднимается вверх (рис. 26.3, *а*), а несмачивающая — опускается вниз (рис. 26.3, *б*). Явления, обусловленные втягиванием смачивающих жидкостей в капилляры или выталкиванием несмачивающих жидкостей из капилляров, называются *капиллярными явлениями*.

Капиллярные явления играют большую роль в природе и технике. Множество мельчайших капилляров имеется в растениях. По ним влага из почвы поднимается до вершин деревьев и через листья испаряется в атмосферу. В почве имеются капилляры, и чем они *гуще*, тем плотнее почва. Вода по этим капиллярам поднимается до поверхности и быстро испаряется, а земля становится сухой. Ранняя весенняя вспашка земли разрушает капилляры, т. е. сохраняет подпочвенную влагу.

В технике также необходимо учитывать капиллярные явления.

Вопросы для самоконтроля

1. Каков механизм смачивания или несмачивания жидкости твердого тела?
2. Что называется *лапласовым давлением*? Как оно направлено?
3. Как объяснить капиллярные явления?
4. Какие примеры капиллярных явлений вам известны?
5. Каковы преимущества осенней и весенней вспашки?
6. Почему считается, что вода — синоним жизни?
7. Чем объяснить, что в сухом воздухе человек выдерживает температуру 100°C и выше?

Примеры решения задач

1. Парциальное давление водяного пара в воздухе при 19°C было $1,1$ кПа. Найти относительную влажность.

Решение. Относительная влажность по определению:

$$\phi = \frac{p}{p_{\text{н.п}}} \cdot 100\%.$$

При $t = 19^\circ\text{C}$ давление насыщенных паров воды равно $p_{\text{на}} = 2,2$ кПа. Поэтому

$$\phi = \frac{1,1 \text{ кПа}}{2,2 \text{ кПа}} \cdot 100\% = 50\%.$$

Ответ : 50%.

2. Ртутный барометр имеет диаметр трубки 3 мм. Какую поправку в показания барометра надо внести, если учитывать капиллярное опускание ртути?

Решение . Изменение давления ртути в барометре за счет капиллярного эффекта равно:

$$\Delta p = \frac{2\sigma}{R}.$$

Надо иметь в виду, что ртуть можно считать абсолютно несмачивающей стекло жидкостью, поэтому Δp в формуле соответствует увеличению давления и барометр будет показывать давление, большее истинного. Величина соответствующего опускания столбика ртути равна:

$$h = \frac{\Delta p}{\rho g} = \frac{2\sigma}{R\rho g} = \frac{4\sigma}{d\rho g},$$

где R — радиус, d — диаметр трубки.

Вычисления:
$$h = \frac{4 \cdot 510 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}}{3 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot 14 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3 \cdot 9,8 \text{ м/с}^2} = 5 \text{ мм}.$$

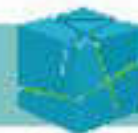
Ответ : 5 мм.

Упражнение 10

1. Температура в комнате 16°C . Относительная влажность воздуха 50%. Найдите абсолютную влажность.
2. Точка росы 7°C , относительная влажность 50%. Какова температура воздуха?
3. Какова относительная влажность воздуха в комнате, в каждом кубическом метре которого содержится $7,7 \cdot 10^{-3}$ кг водяных паров при температуре 15°C ?

Что освоили по этой теме?

Насколько полезна и интересна была для вас полученная информация?	Что еще вы хотели бы узнать по данной теме?	Какие вопросы возникли у вас в ходе изучения темы?



Раздел II. ТЕПЛОВАЯ ФИЗИКА

<p><i>Молекулярно-кинетическая теория строения вещества</i> лежит в основе молекулярной физики. Она утверждает, что <i>все вещества состоят из огромного числа очень малых частиц (молекул), между которыми имеются промежутки. Молекулы находятся в непрерывном беспорядочном (тепловом) движении</i></p>	
<p><i>Постоянная Авогадро</i> равна числу молекул или атомов в 1 моль вещества</p>	$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
<p><i>Число молекул</i> в любом теле (N) равно произведению количества вещества (V) или отношения m/M на постоянную Авогадро (N_A), где V — число молей в теле; m — масса тела; M — масса моля</p>	$N = \nu N_A$
<p><i>Основное уравнение молекулярно-кинетической теории газов</i> (уравнение Клаузиуса)</p>	$p = \frac{1}{3} m m_0 v^2$
<p>Состояние данной массы газа определяется температурой T, давлением p и объемом V. Процессы, в которых изменяются только два параметра, а третий остается постоянным, называют <i>изопроцессами</i>. Таких процессов три:</p>	$N = \nu N_A;$ $N = \frac{m}{M} \cdot N_A$
<p>изотермический</p>	$(T = \text{const})$
<p>изобарный</p>	$(p = \text{const})$
<p>изохорный</p>	$(V = \text{const})$
<p>Закон Бойля — Мариотта : $pV = \text{const}$ ($T = \text{const}$, $m = \text{const}$)</p>	$p_1 V_1 = p_2 V_2$
<p>Закон Гей-Люссака : $V/T = \text{const}$ ($p = \text{const}$, $m = \text{const}$)</p>	$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$
<p>Закон Шарля : $p/T = \text{const}$ ($V = \text{const}$, $m = \text{const}$)</p>	$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$
<p>Уравнение состояния идеального газа (<i>уравнение Клапейрона</i>)</p>	$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} = \text{const}$

Продолжение

<p>Уравнение Менделеева — Клапейрона — универсальное уравнение, описывающее состояние произвольной массы газа</p>	$pV = \frac{m}{M}RT$
<p>Первый закон термодинамики выражает закон превращения и сохранения энергии применительно к термодинамическим процессам. В термодинамической системе изменение внутренней энергии ΔU системы при переходе ее из одного состояния в другое не зависит от способа перехода и равно сумме количества теплоты Q, переданного системе, и работы A внешних сил</p>	$\Delta U = Q + A$
<p>Второй закон термодинамики констатирует необратимость процессов в природе. Он отрицает возможность самопроизвольной передачи теплоты от менее нагретого тела к более нагретому. Второй закон термодинамики отрицает также создание тепловой машины, способной все количество теплоты, полученной от нагревателя, полностью преобразовывать в механическую работу</p>	
<p>Коэффициентом полезного действия теплового двигателя называется отношение работы, совершенной двигателем, к количеству теплоты, полученной рабочим телом от нагревателя</p>	$\eta = \frac{A}{Q_1}$
<p>Максимальный КПД теплового двигателя равен отношению разности температур нагревателя T_1 и холодильника T_2 к температуре нагревателя T_1</p>	$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$

§ 27. Электрическое поле

Ключевые понятия: электрическое поле, напряженность электрического поля, силовые линии электрического поля, принцип суперпозиции.

На этом уроке вы:

познакомитесь с основными свойствами электрического поля и его силовой характеристикой.

Взаимодействие зарядов по закону Кулона является экспериментально установленным фактом. Однако математическое выражение закона взаимодействия зарядов не раскрывает физической картины самого процесса взаимодействия, не отвечает на вопрос, каким путем осуществляется действие заряда q_1 на заряд q_2 .

Английский физик Майкл Фарадей дал факту взаимодействия электрических зарядов следующее объяснение: вокруг каждого электрического заряда всегда существует *электрическое поле*. Электрическое поле — материальный объект, непрерывный в пространстве и способный действовать на другие электрические заряды.

Согласно этим представлениям, взаимодействие электрических зарядов q_1 и q_2 есть результат действия поля заряда q_1 на заряд q_2 и, соответственно, поля заряда q_2 на заряд q_1 .

Тот факт, что электрическое поле *объективно существует*, что оно материально, доказывается при рассмотрении явлений, происходящих при ускоренном движении электрических зарядов. Этот вопрос будет рассмотрен при изучении электромагнитных волн. Здесь мы остановимся только на одном факте.

Пока электрические заряды q_1 и q_2 неподвижны и находятся в точках A и B , на заряд q_2 со стороны заряда q_1 действует сила $-\vec{F}$, направленная вдоль прямой BA (рис. 27.1). Если в некоторый момент времени t заряд q_1 начинает двигаться из точки A к точке C , то модуль и направление силы, действующей на заряд q_2 , должны измениться. Согласно закону Кулона, эти изменения должны были бы происходить мгновенно, т. е. в любой момент



Майкл Фарадей
(1791—1867)

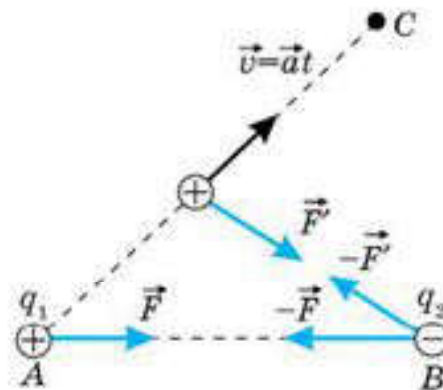


Рис. 27.1

времени кулоновская сила должна быть направлена вдоль прямой, соединяющей заряды.

Однако в действительности наблюдается другая картина. Если в некоторый момент времени t заряд q_1 выходит из состояния покоя и движется ускоренно, то изменение силы, действующей со стороны заряда q_2 на заряд q_1 , наблюдается лишь через промежуток времени Δt , определяемый выражением

$$\Delta t = \frac{l}{c},$$

где l — расстояние между зарядами, $c = 3,0 \cdot 10^8$ м/с — скорость света в вакууме. Запаздывание изменений взаимодействия электрических зарядов при их ускоренном движении доказывает справедливость теории поля. С этой скоростью распространяются любые изменения в электрическом поле при ускоренном движении электрических зарядов.

Запаздывание изменений в электрическом поле на расстояниях в несколько метров обнаружить довольно трудно — из-за большого значения скорости света. В космонавтике же эти запаздывания не только легко обнаружимы, но они создают определенные трудности в управлении космическими аппаратами.

Например, команды, отправленные антеннами радиопередатчиков с пункта космической связи, достигали приемных антенн лунохода лишь через 1,3 с после их отправления, так как расстояние от Земли до Луны составляет примерно 400 000 км. При осуществлении посадки на поверхность планеты Венера автоматические космические станции «Венера» получали команды с Земли спустя 3,5 мин после их отправления, так как расстояние между Землей и Венерой при этом превышало 60 млн. км.

Напряженность электростатического поля. Принцип суперпозиции.

Определим величины, характеризующие электрическое поле. Для этого исследуем поле самого простого точечного заряда q с помощью другого (пробного) точечного заряда $q_{1пр}$. На пробный заряд $q_{1пр}$, внесенный в поле неподвижного заряда q , будет действовать кулоновская сила F_1 :

$$F_1 = k \cdot \frac{qq_{1пр}}{r^2}.$$

В данную точку поля внесем другой пробный заряд $q_{2пр}$. Тогда на него будет действовать кулоновская сила F_2 :

$$F_2 = k \cdot \frac{qq_{2пр}}{r^2}.$$

Найдем соответствующие отношения этих сил к пробным зарядам $q_{1пр}$ и $q_{2пр}$:

$$\frac{F_1}{q_{1пр}} = \frac{F_2}{q_{2пр}} = \frac{kq}{r^2} = \text{const.}$$

Это отношение независимо от выбора пробного заряда $q_{пр}$ всегда остается постоянной величиной. Следовательно, отношение вида $\frac{F}{q_{пр}}$ является особым отношением, характеризующим поле в данной точке.

Физическая величина, характеризующая поле в заданной точке и определяемая отношением вида $\frac{F}{q_{пр}}$, называется **напряженностью поля**. Напряженность обозначается буквой E .

Сила F_1 , с которой поле воздействует на пробный заряд, является векторной величиной. Следовательно, напряженность поля \vec{E} , которая определяется отношением $\frac{\vec{F}}{q_{пр}}$, также является векторной величиной:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_{пр}}, \quad (27.1)$$

Единицей напряженности электрического поля, как это вытекает из формулы (27.1), является **ньютон на кулон (Н/Кл)**.

Из последней формулы видно, что **напряженность является силовой характеристикой электрического поля**. Стало быть, направление напряженности в любой точке поля совпадает с направлением силы, действующей со стороны поля на положительный пробный заряд, помещенный в эту же точку (рис. 27.2).

Таким образом:

- если заряд q положителен, то вектор направлен от заряда (рис. 27.3, а);
- если заряд q отрицателен, то вектор направлен к заряду (рис. 27.3, б).

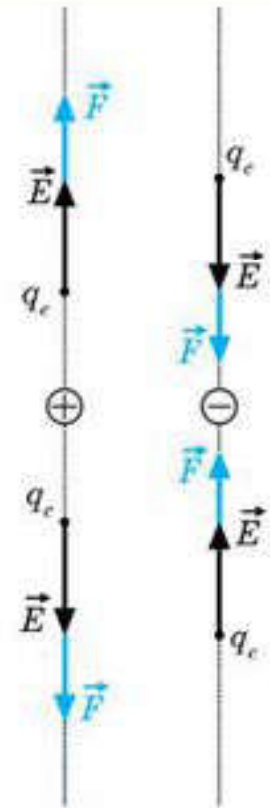


Рис. 27.2

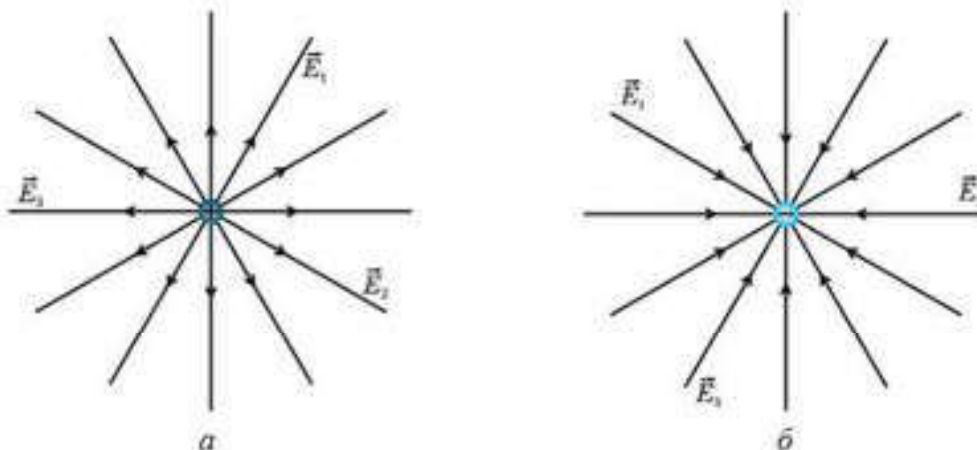


Рис. 27.3

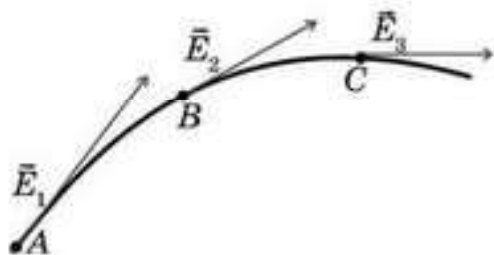


Рис. 27.4

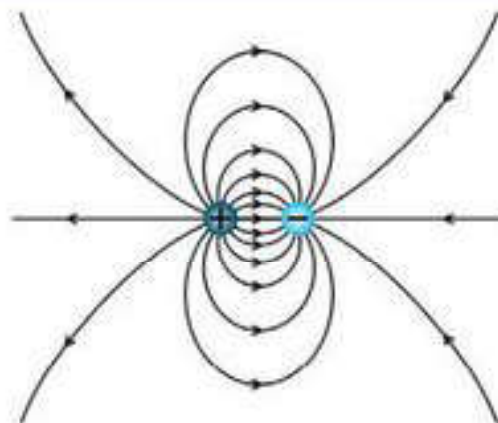


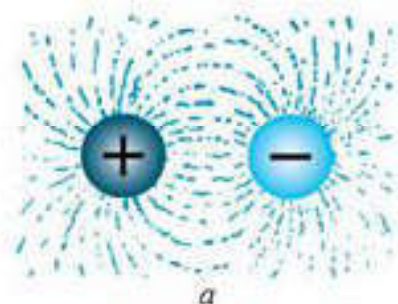
Рис. 27.5

По предложению М. Фарадея принято наглядно представлять электрическое поле *линиями напряженности*, или иначе — *силовыми линиями*. Так, например, электрическое поле точечных зарядов представлено радиальными силовыми линиями (рис. 27.3).

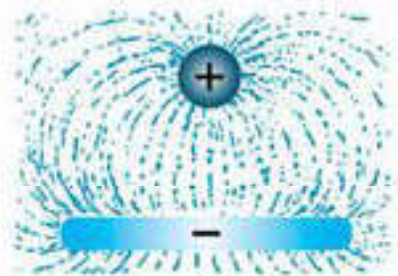
Силовым линиям, как видно на рисунках 27.3—27.5, приписывают определенное направление, которое совпадает с направлением векторов напряженностей поля. Поэтому, как и векторы напряженностей, силовые линии положительного заряда направлены от него, а отрицательного, наоборот, — к заряду.

В общем случае силовые линии могут быть представлены любыми кривыми линиями (рис. 27.4). Тогда напряженность электрического поля в любой точке кривой будет направлена по касательной, проведенной через эту точку.

Электрическое поле, созданное заряженными частицами, находящимися в покое в данной системе отсчета, называется **электростатическим полем**.



а



б

Рис. 27.6

Силовыми линиями (или линиями напряженности) называются линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлениями векторов напряженностей в этих же точках поля.

Силовые линии проводятся так, чтобы их густота была тем больше, чем больше напряженность электрического поля. Действительно, вблизи точечного заряда напряженность поля больше, соответственно, силовые линии расположены гуще (рис. 27.3). Это условие выполняется и при изображении электрического поля системы из двух и более зарядов (рис. 27.5, 27.6, а).

Наглядную картину силовых линий можно получить и опытным путем. Например, на

любую непроводящую поверхность устанавливают различные металлические пластины и насыпают мелкие кристаллики гипосульфита. Когда пластинки заряжаются, то кристаллики при легкой вибрации располагаются вдоль силовых линий электрического поля, созданного между пластинами (рис. 27.6, б).

Частным случаем электрического поля является *однородное поле*.

Если вектор напряженности электрического поля \vec{E} одинаков во всех точках поля, то такое поле называется *однородным*.

Однородное электрическое поле можно получить между двумя близко расположенными параллельными пластинами. Для этого их следует равномерно зарядить разноименными, равными по абсолютному значению зарядами.

На рисунке 27.7 показаны силовые линии электрического поля, заключенного между параллельными пластинами. В средней части пространства между пластинами создается однородное электрическое поле. Действительно, векторы напряженности на этом участке поля и по модулю, и по направлению равны, т. е. $\vec{E} = \text{const}$.

Электрическое поле обладает рядом особых свойств.

1. *Силовые линии электрического поля системы зарядов разомкнуты*, потому что они начинаются на положительных зарядах и оканчиваются — на отрицательных (рис. 27.5, 27.6).

2. *Силовые линии одиночных зарядов "уходят" в бесконечность* (рис. 27.3, а) или "приходят" из бесконечности (рис. 27.3, б).

3. *Силовые линии электрического поля не пересекаются*. Такое заключение вытекает из опытных данных (рис. 27.6). Действительно, вектор \vec{E} в любой точке поля имеет единственное направление (рис. 27.4). Отсюда следует, что силовые линии не пересекаются, в противном случае вектор в одной и той же точке имел бы не одно, а несколько направлений.

Электрическое поле, действуя на заряд с определенной силой, перемещает его и совершает работу. *Работа однородного электрического поля по перемещению заряда не зависит от формы траектории заряда. Она определяется только положением начальной и конечной точек траектории.*

Если в точку В (рис. 27.8) поместить положительный заряд q , то поле, согласно формуле (27.1), действует на него с силой $\vec{F} = q\vec{E}$. Под воздействием

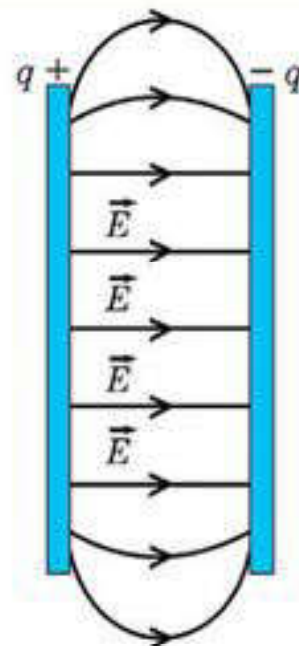


Рис. 27.7

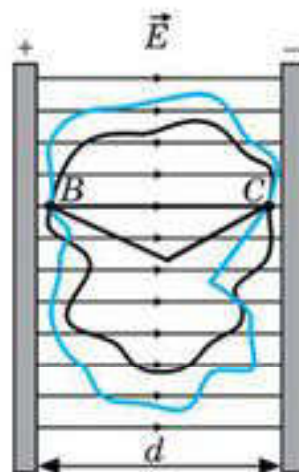


Рис. 27.8

этой силы, направление которой совпадает с направлением \vec{E} , заряд перемещается по направлению поля и достигает точки C . При этом совершается положительная работа:

$$A_+ = F \cdot d = qEd, \quad (27.2)$$

где d — расстояние между пластинами.

Этот результат остается неизменным для любой формы траектории движения заряда между точками B и C . Поэтому работа электрического поля зависит только от положения начальной и конечной точек траектории движения заряда.

Если некоторая *постоянная сила* заставляет положительный заряд двигаться в обратном направлении от точки C до точки B , то совершается такая же работа с обратным знаком:

$$A_- = -qEd.$$

Определим суммарную работу по замкнутой траектории $B \rightarrow C \rightarrow B$:

$$A = A_+ + A_- = 0.$$

Отсюда следует, что *работа по перемещению заряда по замкнутой траектории равна нулю*.

Определим напряженность электрического поля точечного заряда. Для того чтобы определить напряженность электрического поля точечного заряда q , на расстоянии r от него поместим пробный заряд $q_{\text{пр}}$. По закону Кулона, заряды взаимодействуют с силой

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{qq_{\text{пр}}}{\epsilon r^2}. \quad (27.3)$$

Тогда *напряженность поля точечного заряда q равна*

$$E = \frac{F}{q_{\text{пр}}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{\epsilon r^2}. \quad (27.4)$$

Как правило, в реальной жизни электрическое поле образуется не одним, а несколькими зарядами: $q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$. В этих условиях, как это экспериментально доказано, результирующая сила \vec{F} , действующая на пробный заряд $q_{\text{пр}}$, равна векторной сумме сил:

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots + \vec{F}_n \quad (27.5)$$

где $\vec{F}_1; \vec{F}_2; \vec{F}_3; \dots; \vec{F}_n$ — соответствующая сила, действующая на пробный заряд со стороны каждого $q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$ заряда.

Из формул 27.1, 27.3, 27.4 имеем:

$$\vec{F} = q_{\text{пр}} \vec{E}; \quad \vec{F}_1 = q_{\text{пр}} \vec{E}_1; \quad \vec{F}_2 = q_{\text{пр}} \vec{E}_2; \quad \vec{F}_3 = q_{\text{пр}} \vec{E}_3; \quad \dots;$$

где $q_{\text{пр}}$ — внесенный извне пробный заряд; \vec{E} — напряженность поля системы зарядов; $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \vec{E}_3, \dots, \vec{E}_n$ — соответствующая напряженность поля, создаваемого зарядами q_1, q_2, \dots, q_n .

Подставив эти выражения в уравнение 27.5, получим:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots + \vec{E}_n, \quad (27.6)$$

Данная векторная сумма отражает принцип наложения (суперпозиции) полей.

Согласно этому принципу, напряженность поля системы зарядов равна векторной сумме напряженностей полей, создаваемых в данной точке каждым из зарядов в отдельности.

На рисунке 27.9 показано наложение полей двух положительных зарядов q_1 и q_2 в точке B . Согласно принципу наложения полей, результирующая напряженность полей в точке B равна векторной сумме:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2,$$

где $E_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1}{r_1^2}$, $E_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_2}{r_2^2}$.

Векторная сумма $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$ находится по правилу параллелограмма (рис. 27.9).

Следует подчеркнуть, что в точке B , где происходит наложение двух полей с векторами напряженностей \vec{E}_1 и \vec{E}_2 , силовые линии каждого из полей искривляются и накладываются друг на друга. Следовательно, через точку B в условиях суперпозиции полей проходит только одна силовая линия результирующего единственного электрического поля \vec{E} . Стало быть, не должно возникать ложное представление о том, что в точке B пересекается несколько силовых линий одного и того же поля.

Проведем аналогию между электростатическим полем и полем тяготения, используя данные таблицы 27.1.

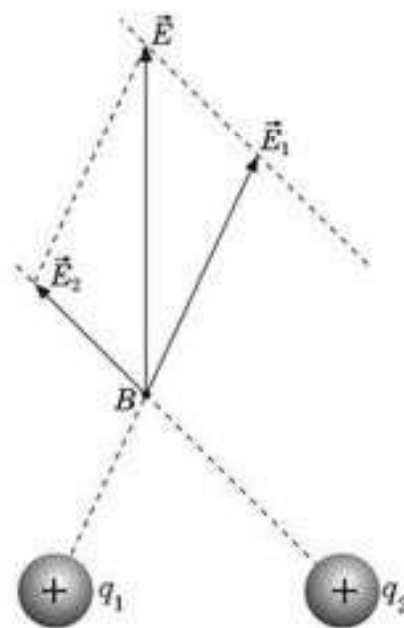


Рис. 27.9

Таблица 27.1

Сравнительная таблица величин поля тяготения и электрического поля

Физический смысл величины	Величина	
	В поле тяготения	В электрическом поле
Характеристика тела, от которой зависит сила, действующая на него	Масса, m	Заряд, q
Величина, определяющая свойства поля	Ускорение свободного падения, g	Напряженность, E
Сила, действующая на тело и на заряд	$\vec{F} = m\vec{g}$	$\vec{F} = q\vec{E}$

На основе закона Кулона и формулы напряженности электрического поля получаем выражение для напряженности поля точечного заряда:

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

Вопросы для самоконтроля

1. Как объясняет взаимодействие электрических зарядов теория поля?
2. Какие опытные факты доказывают справедливость теории поля?
3. Что понимают под электрическим полем?
4. Каково основное свойство *электрического поля*?
5. Какие поля называются электростатическими?
6. Что такое *напряженность электрического поля*? Чему равна сила, действующая на заряд q в электрическом поле напряженностью E ?
7. Что называется *силовой линией*? Какие свойства силовых линий вы знаете?
8. Какое электрическое поле называется *однородным*? Как его получают?
9. Чему равна работа по перемещению заряда в однородном электрическом поле?
10. Чему равна напряженность поля точечного заряда?
- *11. В чем заключается физический смысл принципа наложения (суперпозиции) полей?
- *12. Как определяется векторная сумма напряженностей полей?

Упражнение 11

1. Докажите, что работа по перемещению заряда по замкнутой траектории в электрическом поле равна нулю.
2. Сравните работу по перемещению заряда по замкнутой траектории в электрическом поле с работой по перемещению тела по замкнутой траектории в гравитационном поле Земли.
3. На основании суперпозиции полей графически объясните, почему электрическое поле между двумя параллельными бесконечными пластинами, заряженными разноименными, но одинаковыми по абсолютной величине зарядами, отлично от нуля, а в пространстве за пластинами – равно нулю.
4. Какая сила будет действовать на заряд $q = 3 \cdot 10^{-8}$ Кл, если его поместить в точку поля, напряженность в которой $E = 600$ Н/Кл?
5. На расстоянии 10 см от заряженного шарика на заряд $q = 1 \cdot 10^{-9}$ Кл действует сила $F = 1,5 \cdot 10^{-2}$ Н. Найдите напряженность поля в этой точке и определите заряд шарика.
6. Вычислите силу, действующую на электрон в электрическом поле, напряженность которого $E = 10^6$ Н/Кл. С каким ускорением движется электрон?
7. Рассчитайте напряженность поля, связанного с точечным зарядом $1 \cdot 10^{-8}$ Кл, на расстоянии 30 см от него.
8. Найдите напряженность поля системы двух точечных зарядов $q_1 = 3 \cdot 10^{-7}$ Кл и $q_2 = 2 \cdot 10^{-7}$ Кл в точке, лежащей посередине между зарядами, если расстояние между ними $r = 20$ см.

Что освоили по этой теме?

Насколько полезна и интересна была для вас полученная информация?

Что еще вы хотели бы узнать по данной теме?

Какие вопросы возникли у вас в ходе изучения темы?

§ 28. Конденсаторы. Емкость. Единицы измерения емкости и количества электричества

Ключевые понятия: электроемкость, конденсатор.

На этом уроке вы:

научитесь объяснять роль конденсатора в электрических цепях.

Конденсатор представляет собой систему из двух проводников (обкладок), разделенных тонким слоем диэлектрика. Толщина диэлектрика должна быть много меньше размеров самих обкладок. Тогда электрическое поле, создаваемое зарядами на конденсаторе, будет практически целиком сосредоточено между его обкладками.

В первом конденсаторе, изобретенном Клейстом в середине XVIII в., одной обкладкой служила ртуть, а другой — рука экспериментатора, державшего банку. В современном бумажном конденсаторе обкладками являются две туго свернутые полоски алюминиевой фольги, изолированные друг от друга бумагой, пропитанной парафином. Кроме бумажных, по типу используемого диэлектрика различают воздушные, керамические, слюдяные и другие конденсаторы. В электролитических конденсаторах диэлектриком является оксидная пленка, нанесенная на поверхность металлической пластинки, служащей одной из обкладок конденсатора; роль второй обкладки играет электролит.

Если зарядить конденсатор, сообщив одной из его обкладок заряд $+q$, а другой — такой же по модулю, но противоположный по знаку заряд $-q$, то между обкладками конденсатора установится **разность потенциалов** U . Так как эта разность потенциалов будет пропорциональна заряду конденсатора ($U \sim q$), то отношение $\frac{q}{U}$ уже не будет зависеть ни от q , ни от U .

Определение. Скалярная физическая величина, равная отношению заряда одной из обкладок конденсатора к разности потенциалов между этой обкладкой и соседней, называется **электрической емкостью конденсатора** :

$$C = \frac{q}{U}. \quad (28.1)$$

Электрическая емкость (или просто емкость) конденсатора определяется геометрическими размерами обкладок конденсатора, их формой, взаимным расположением, а также диэлектрической проницаемостью среды, которая находится между ними.

Из определения емкости следует, что заряд конденсатора:

$$q = CU. \quad (28.2)$$

Поэтому при одном и том же напряжении больший заряд можно накопить на том конденсаторе, у которого больше емкость.

Единицей емкости в СИ является **фарад** (1 Ф). 1 Ф равен емкости такого конденсатора, у которого при заряде в 1 Кл между обкладками появляется напряжение 1В. Фарад — это очень большая емкость. Поэтому на практике чаще используют дольные единицы — *микрофарад* (1 мкФ = 10^{-6} Ф), *нанофарад* (1 нФ = 10^{-9} Ф) и *пикофарад* (1 пФ = 10^{-12} Ф).

Конденсаторы применяются для накопления электрической энергии и использования ее при быстром разряде (фотоспышка), для разделения цепей постоянного и переменного тока, в выпрямителях, колебательных контурах и других радиоэлектронных устройствах.

Часто для практических целей конденсаторы соединяют в батареи. Соединения конденсаторов в батарею производят последовательно и параллельно.

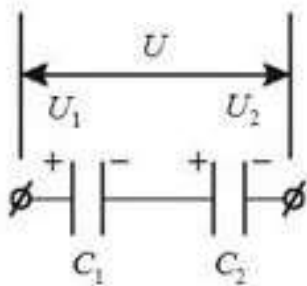


Рис. 28.1

Последовательное соединение конденсаторов.

При последовательном соединении конденсаторов заряды одинаковы на всех конденсаторах (и они равны заряду всей батареи). Из рис. 28.1 видно, что, если поместить заряд $+q$ на левую обкладку конденсатора C_1 , то из-за электростатической индукции на его правой обкладке появится заряд $-q$, на левой обкладке конденсатора C_2 возникнет заряд $+q$, а на его правой обкладке $-q$. Таким образом, заряд каждого из последовательно включенных конденсаторов равен q , т. е.

$$q_1 = q_2 = q.$$

Тогда напряжение на каждой из обкладок этих конденсаторов будет равно: $U_1 = \frac{q}{C_1}$; $U_2 = \frac{q}{C_2}$; напряжение на всей батарее конденсаторов:

$$U = U_1 + U_2, \text{ или } \frac{q}{C} = \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2}.$$

Следовательно, емкость батареи конденсаторов будет определяться из выражения: $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$.

Из всего вышесказанного можно определить основные признаки последовательного соединения конденсаторов:

$$\left. \begin{aligned} 1. & q_1 = q_2 = q_3 = \dots = q_n; \\ 2. & U = U_1 + U_2 + \dots + U_n; \\ 3. & \frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n}; \\ 4. & U_1 : U_2 : U_3 : \dots = \frac{1}{C_1} : \frac{1}{C_2} : \frac{1}{C_3} : \dots \end{aligned} \right\} \quad (28.3)$$

Параллельное соединение конденсаторов.

При параллельном соединении конденсаторов потенциалы левых обкладок конденсаторов C_1 и C_2 (рис. 28.2) одинаковы и имеют положительный знак. Так же одинаковы потенциалы их правых обкладок (они имеют отрицательный знак). Значит, при параллельном соединении напряжения на отдельных конденсаторах одинаковы и равны напряжению цепи:

$$U = U_1 = U_2.$$

Заряды, накопленные конденсаторами при этом соединении, разные (они зависят от емкости конденсатора прямо):

$$q_1 = C_1 U, \quad q_2 = C_2 U.$$

Общий заряд батареи конденсаторов равен:

$$q = q_1 + q_2 = C_1 U + C_2 U = U(C_1 + C_2).$$

А так как $q = CU$, то $C = C_1 + C_2$, где C — емкость батареи конденсаторов. То есть *емкость батареи параллельно соединенных конденсаторов равна сумме емкостей отдельных конденсаторов*. Отсюда выводим признаки параллельного соединения конденсаторов:

$$\left. \begin{array}{l} 1. q = q_1 + q_2 + \dots + q_n; \\ 2. U = U_1 = U_2 = U_3 = \dots = U_n; \\ 3. C = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n; \\ 4. q_1 : q_2 : q_3 = C_1 : C_2 : C_3 : \dots \end{array} \right\} \quad (28.4)$$

Работа сил электрического поля при перемещении заряда q между двумя точками поля равна $A = qU$, если напряжение U остается постоянным. Однако при зарядке конденсаторов напряжение на его обкладках возрастает от нуля до U (рис. 28.3), и при вычислении работы поля в этом случае для напряжения нужно брать его среднее значение.

$$\text{Таким образом, } A = qU_{\text{cp}} = \frac{q(U + 0)}{2} = \frac{qU}{2}.$$

Поскольку работа A идет на увеличение энергии $W_{\text{эл}}$ заряженного конденсатора, то $W_{\text{эл}} = A$. Следовательно, энергия заряженного конденсатора выражается формулой:

$$W_{\text{эл}} = \frac{qU}{2}. \quad (28.5)$$

Так как $q = CU$, получаем еще одну формулу для энергии конденсатора:

$$W_{\text{эл}} = \frac{CU^2}{2}. \quad (28.6)$$

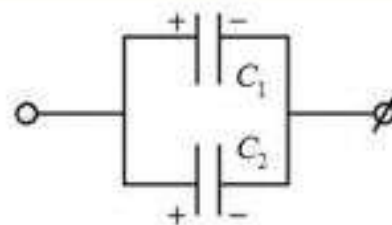


Рис. 28.2

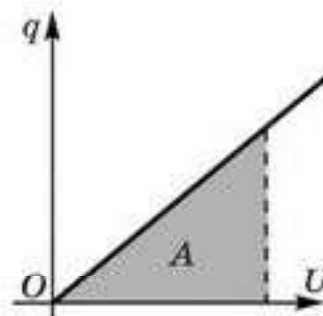


Рис. 28.3

Так как $U = \frac{q}{C}$, то

$$W_{эл} = \frac{q^2}{2C}. \quad (28.7)$$

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое *конденсатор* ?
2. Какие виды конденсаторов вы знаете?
3. Что такое *электрическая емкость* ?
4. Чему равна емкость плоского конденсатора?
5. Какие единицы емкости вы знаете?
6. Сколько кулонов электричества нужно пропустить через раствор азотнокислого серебра, чтобы выделить из раствора 0,559 г серебра?

Пример решения задачи

Емкость первого конденсатора 0,5 мкФ, а второго — 5000 пФ. Сравнить напряжения, которые надо подавать на эти конденсаторы, чтобы накопить одинаковые заряды.

Решение. Из формулы для емкости плоского конденсатора следует, что $Q = CU$.

Для двух конденсаторов с одинаковыми зарядами, но разными емкостями:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{C_2}{C_1} = \frac{5000 \cdot 10^{-12}}{0,5 \cdot 10^{-6}} = \frac{1}{100}.$$

Ответ : в 100 раз больше.

Упражнение 12

1. Определите разность потенциалов между двумя точками поля, если при перемещении заряда $q = 1,5 \cdot 10^{-7}$ Кл из одной точки в другую совершается работа $A = 9 \cdot 10^{-5}$ Дж.
2. Какая работа производится электрическим полем с разностью потенциалов $\Delta\phi = 220$ В при перемещении заряда $q = 5$ Кл?
3. Напряженность однородного электрического поля между двумя пластинами $E = 2,5 \cdot 10^4$ В/м. Найдите разность потенциалов между пластинами, если расстояние между ними $d = 2$ см.
4. Какова напряженность однородного поля между двумя пластинами, расстояние между которыми 0,1 м, а разность потенциалов 220 В?
5. Чтобы зарядить конденсатор до разности потенциалов $\Delta\phi = 40$ В, ему необходим заряд $q = 2 \cdot 10^{-4}$ Кл. Чему равна емкость конденсатора?
6. Конденсатор, емкость которого 10 мкФ, заряжают до разности потенциалов $\Delta\phi = 220$ В. Найдите его заряд и энергию.

Что освоили по этой теме?

Насколько полезна и интересна была для вас полученная информация?	Что еще вы хотели бы узнать по данной теме?	Какие вопросы возникли у вас в ходе изучения темы?
---	---	--

§ 29. Электродвижущая сила источника тока и внутреннее сопротивление. Напряжение и разность потенциалов

Ключевые понятия: сторонние силы, ЭДС, напряжение.

На этом уроке вы:

познакомитесь с принципом работы источника тока; узнаете различие между ЭДС и напряжением.

Из курса 8 класса нам известно, что для того, чтобы в цепи существовал электрический ток, электрическая цепь должна быть замкнутой и содержать устройство, создающее разность потенциалов.

Количественно электрический ток характеризуется силой тока.

Силой тока I называется физическая величина, численно равная количеству заряда Δq , перенесенного через поперечное сечение проводника за единицу времени Δt :

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}. \quad (29.1)$$

Рассмотрим связь между силой тока и зарядом (рис. 29.1). Пусть заряженные частицы за счет приложенного электрического поля перемещаются вдоль проводника и за время Δt через этот объем проводника длиной $l = v\Delta t$ и площадью поперечного сечения S пройдут все заряженные частицы, которые движутся со скоростью v .

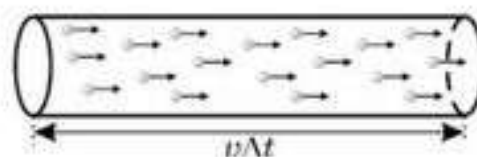


Рис. 29.1

Если концентрация заряженных частиц равна n , то число заряженных частиц N , содержащихся в данном объеме, равно $N = nv\Delta tS$. Поскольку каждая заряженная частица несет с собой заряд q_0 , то можем определить полный заряд Δq , прошедший через выделенный объем за время Δt : $\Delta q = q_0N = q_0nv\Delta tS$, где q_0 — заряд одной заряженной частицы.

С учетом формулы (29.1) можем записать:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} = q_0nSv. \quad (29.2)$$

Из формулы (29.2) следует, что если скорость зарядов не зависит от времени, то сила тока будет постоянной, т. е. $I = \text{const}$.

Электрический ток, сила которого не изменяется со временем, называется постоянным.

В дальнейшем мы рассмотрим вопросы, связанные только с постоянным током.

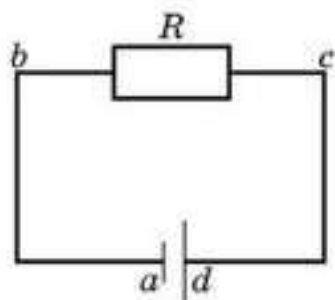


Рис. 29.2

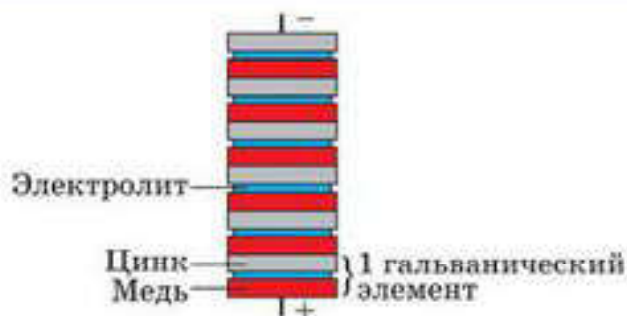


Рис. 29.3

В замкнутой электрической цепи различают *внешнюю* и *внутреннюю* части. Внешняя цепь обычно содержит различные приборы и устройства, называемые потребителями, или нагрузкой с сопротивлением R . Внутреннюю цепь представляет источник тока.

На свободные заряды во внешней части ($abcd$) замкнутой цепи будут действовать силы электрического поля, а во внутренней (ad) — неэлектрические силы, называемые сторонними (рис. 29.2).

Электростатические силы вызывают соединение разноименных зарядов, вследствие чего уменьшается величина зарядов проводника, соответственно, уменьшается и разность потенциалов. Сторонние силы, наоборот, способствуют разделению разноименных зарядов и поддерживают разность потенциалов на концах проводника.

Именно благодаря сторонним силам на концах внешней цепи поддерживается разность потенциалов, и в ней идет постоянный ток.

Сторонними силами называют силы неэлектрической природы, вызывающие направленное движение электрически заряженных частиц.

Сторонние силы могут быть созданы источниками тока: гальваническими элементами, аккумуляторами, батарейками, а также более мощными электрическими генераторами, которые используют энергию ветра, воды, органического топлива и т. д.

Так, например, в гальваническом элементе заряды на электродах оказываются разноименными за счет энергии химической реакции между электродами и электролитом; в электрических генераторах — за счет механической энергии вращения ротора генератора и т. п. (рис. 29.3.)

Внутреннее сопротивление. Постоянный ток может существовать лишь в замкнутой электрической цепи. Замкнутая (или полная) электрическая цепь состоит из двух частей: внешней и внутренней. *Внешнюю* часть цепи образуют различные потребители тока и подводящие провода, а *внутреннюю* — источники тока (гальванические элементы, аккумуляторы и др.).

Каждая часть электрической цепи обладает своим сопротивлением электрическому току. Сопротивление внешней цепи называют *внешним*

сопротивлением (его обозначают R), а сопротивление внутренней части цепи — внутренним сопротивлением (обозначается r). Их сумму называют полным сопротивлением цепи:

$$R_{\text{п}} = R + r. \quad (29.3)$$

Устройство, разделяющее положительные и отрицательные заряды, называется источником тока.

А. Вольта в 1799 г. сконструировал первый источник тока — *вольтов столб*. Это изобретение принесло ему всемирную славу. Этот источник тока представлял собой цилиндрический столбик, состоявший из 20 пар медных и цинковых пластинок, разделенных суконными кружочками, смоченными соленой водой.

Вольтов столб — источник тока.

В СИ единицей ЭДС является вольт (В).

$$1 \text{ В} = 1 \text{ Дж/Кл.}$$

Напряжение, создаваемое одним гальваническим элементом (например, пальчиковой батареей), обычно находится в интервале 1—2 В, а напряжение между облаками во время грозы может достигать 100 миллионов вольт!

Выходное напряжение зависит от силы тока, получаемого от источника тока. Внутреннее сопротивление нового 1,5-вольтового гальванического элемента составляет около 0,1 Ом. Если этот элемент обеспечивает силу тока 1 А, его выходное напряжение ненамного меньше номинальной ЭДС:

$$U = \mathcal{E} - Ir = 1,5 \text{ В} - 1 \text{ А} \cdot 0,1 \text{ Ом} = 1,4 \text{ В.}$$

Внутреннее сопротивление элемента увеличивается по мере старения батарей.

Отношение работы сторонних сил к переносимому заряду $\frac{A_{\text{ст}}}{q}$ является постоянной величиной для данного источника тока и называется *электродвижущей силой* (сокращенно: ЭДС, обозначается буквой \mathcal{E}).

Электродвижущая сила — физическая величина, равная отношению работы, совершаемой сторонними силами по перемещению положительного заряда от отрицательного полюса источника тока к положительному, к величине этого заряда:

$$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{ст}}}{q}. \quad (29.4)$$

Рассмотрим один из видов источника тока. Так, в элементе Вольта заряды на электродах оказываются разноименными — за счет химической реакции между электродами и электролитом. В сосуд, в котором

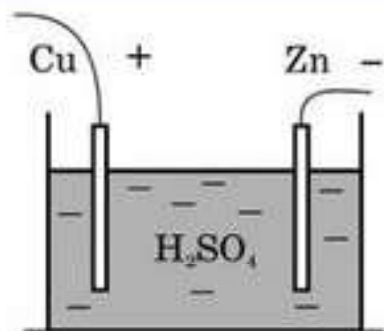


Рис. 29.4

находится раствор серной кислоты H_2SO_4 , помещают цинковый и медный электроды (рис. 29.4). Атомы цинка активнее взаимодействуют с серной кислотой, и ионы цинка вырываются из цинкового электрода, замещая H_2 в молекуле H_2SO_4 . Поэтому цинковый электрод, потеряв положительный ион, заряжается отрицательно. Медь же практически не взаимодействует с молекулами H_2SO_4 . Поэтому между медным и цинковым электродами возникает разность потенциалов.

Если источник тока не замкнут, то в этом элементе между медным электродом и электролитом возникает разность потенциалов порядка $+0,34$ В, а между цинковым электродом и электролитом — порядка $-0,76$ В. В итоге между медным и цинковыми электродами возникает постоянное напряжение, равное разности потенциалов примерно $1,1$ В, которое не зависит ни от расстояния между электродами, ни от площади электродов, а будет определяться только химическими свойствами веществ, из которых изготовлен данный элемент.

Очевидно, если на участке цепи действуют не только электростатические силы, но и сторонние силы, то работа по перемещению заряда будет складываться из работы электростатических сил $A_э$ и работы сторонних сил $A_{ст}$, т. е. полная работа, необходимая для протекания в цепи постоянного тока, равна

$$A = A_{ст} + A_э. \quad (29.5)$$

Разделим обе части уравнения (29.5) на заряд q :

$$\frac{A}{q} = \frac{A_{ст}}{q} + \frac{A_э}{q}. \quad (29.6)$$

В этом равенстве отношение $\frac{A}{q}$ называется *напряжением* U , или *падением напряжения* на определенном участке: $U = \frac{A}{q}$.

Напряжение — физическая величина, равная отношению работы всех сил, действующих на данном участке, к значению переносимого заряда.

Согласно формуле (29.4) $\frac{A_{ст}}{q}$ — ЭДС, а $\frac{A_э}{q} = \phi_1 - \phi_2$ представляет собой разность потенциалов на участке цепи. Учитывая это, уравнение (29.6) запишем в следующем виде:

$$U = \mathcal{E} + (\phi_1 - \phi_2). \quad (29.7)$$

Из формулы видно, что напряжение в общем случае равно сумме разности потенциалов на концах этого участка и действующей на нем электродвижущей силы.

Если на участке действуют только электростатические силы и полюсы источника тока будут разомкнуты, то $U = \phi_1 - \phi_2$. Следовательно, на участке цепи, не содержащем источник тока, напряжение равно разности потенциалов.

Опыт. Можно изготовить собственный электролитический элемент, используя лимон или любой цитрусовый фрукт, медную монету и оцинкованный гвоздь. Введите монету и гвоздь в лимон достаточно близко, но так, чтобы они не касались друг друга. Если у вас есть чувствительный вольтметр, то можно обнаружить разность потенциалов между медной монетой и оцинкованным гвоздем.

Вопросы для самоконтроля

1. Что называется *электрическим током* ?
2. Какие условия необходимо выполнить, чтобы в цепи возник электрический ток?
3. Как направлен электрический ток?
4. Какая физическая величина называется *силой тока* ? В каких единицах она измеряется?
5. Какой ток называют *постоянным* ?
6. Как связана сила тока с зарядом?
7. Какие силы называются *сторонними* ?
8. Что представляет собой источник тока? Какова роль источника тока в электрической цепи?
- *9. Каков физический смысл электродвижущей силы источника тока?
- *10. Как устроен и работает любой гальванический элемент?
11. Чему равно напряжение на участке цепи, не содержащем источник тока?
12. Чему равно напряжение на участке цепи, где включен источник тока?

Что освоили по этой теме?

Насколько полезна и интересна была для вас полученная информация?	Что еще вы хотели бы узнать по данной теме?	Какие вопросы возникли у вас в ходе изучения темы?

§ 30. Законы Ома

Ключевые понятия: законы Ома для участка и полной цепи, сопротивление.

На этом уроке вы: познакомитесь с законами протекания тока в электрической цепи.

I. Закон Ома для участка цепи. В курсе физики основного уровня школы вы уже изучали закон Ома для однородного участка цепи и знаете, что для существования тока в проводнике необходимо создать разность потенциалов на его концах.

Разность потенциалов между концами однородного проводника называется напряжением.

Однородным является проводник, в котором не действуют сторонние силы. Для каждого проводника — твердого, жидкого, газообразного, плазменного существует определенная зависимость силы тока от приложенной к нему разности потенциалов. Опыты показывают, если однородный проводник поддерживать при постоянной температуре, то сила текущего по нему тока оказывается пропорциональной приложенному напряжению:

$$I = kU.$$

Впервые зависимость силы тока от напряжения была экспериментально получена в 1826 г. Георгом Омом.

Он ввел понятие ЭДС и силы тока, сформулировал закон, названный впоследствии его именем, и применил этот закон к различным электрическим цепям, в частности, к последовательному и параллельному соединениям проводников.

Сила тока в цепи измеряется амперметром, который включается в цепь последовательно. Напряжение же на участке измеряется вольтметром, который включается в участок цепи параллельно.

Сила тока в цепи зависит от характеристик источника тока, т. е. от внутреннего его сопротивления и ЭДС, а также от сопротивления внешнего участка цепи.

Г. Ом вместо коэффициента k ввел величину, обратную ему $R = \frac{1}{k}$ и назвал ее *сопротивлением проводника*.

Единицей сопротивления в СИ является Ом:

$$1 \text{ Ом} = \frac{1 \text{ В}}{1 \text{ А}}.$$

С учетом этого получим закон Ома для участка цепи:

$$I = \frac{U}{R}. \quad (30.1)$$

Закон Ома для участка цепи гласит: *сила тока на участке цепи прямо пропорциональна приложенному к нему напряжению и обратно пропорциональна сопротивлению этого же участка.*

Зависимость силы тока в проводнике от приложенного к нему напряжения $I(U)$ называют *вольт-амперной характеристикой проводника.*

Сопротивление — основная электрическая характеристика проводника. Сопротивление проводника зависит от его размеров и формы, а также от материала, из которого он изготовлен. Так, сопротивление однородного цилиндрического проводника равно:

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (30.2)$$

где ρ — удельное сопротивление проводника; l — длина проводника; S — площадь его поперечного сечения.

Каждый материал обладает присущим только ему удельным сопротивлением, которое изменяется в зависимости от температуры материала. С повышением температуры материала его удельное сопротивление возрастает.

Это можно объяснить следующим образом. Под действием электрического тока электроны движутся в кристаллической решетке проводника, одновременно участвуя и в тепловом движении. При малой температуре амплитуда колебаний ионов в узлах кристаллической решетки невелика, поэтому электроны почти беспрепятственно движутся в проводнике.

При повышении температуры проводника увеличиваются скорость теплового движения электронов и амплитуда колебаний ионов в узлах кристаллической решетки, соответственно, возрастает сопротивление их направленному движению. Зависимость сопротивления проводника от температуры выражается следующей формулой:

$$R = R_0 (1 + \alpha t), \quad (30.3)$$

где R_0 — сопротивление проводника при 0°C , t — температура проводника в градусах Цельсия, R — сопротивление проводника при температуре t , α — температурный коэффициент сопротивления.

Единица удельного сопротивления — Ом · метр (1 Ом · м).

Как вам известно, $R = \rho \frac{l}{S}$, тогда зависимость (30.3) будет справедлива и для удельного сопротивления, т. е.:

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha t). \quad (30.4)$$

Для большинства чистых металлов температурный коэффициент сопротивления $\alpha = \frac{1}{273} \text{ K}^{-1}$.

По изменению сопротивления проводника можно определить температуру, что используется при измерении очень высоких и низких

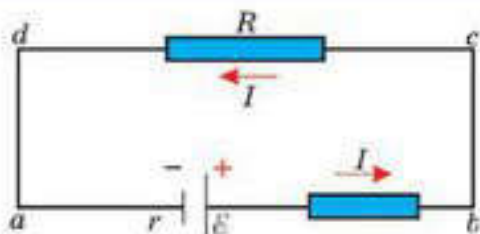


Рис. 30.1

температур. С помощью металлических термометров, называемых *термометрами сопротивления*, можно измерить, например, температуры плавления металла и сжиженных газов.

II. Закон Ома для полной цепи. Рассмотрим теперь замкнутую (полную) цепь, состоящую из источника тока с ЭДС и внутренним сопротивлением r , а также внешней части цепи, сопротивление которой R (рис. 30.1). В рассматриваемой цепи резистор вместе с подводящими проводами образует внешнюю цепь — участок цепи ($adcb$) вне источника тока. Тогда общее сопротивление R_0 внешней и внутренней цепи равно:

$$R_0 = R + r.$$

Учитывая, что работа поля A по перемещению заряда q по участку цепи равна $A = qU$, где $U = IR$ и $q = It$, можно записать $A = UIt$, или $A = I^2 R_0 t$, или

$$A = I^2(R + r) \cdot t. \quad (30.5)$$

Однако эта работа равна и работе сторонних сил по перемещению заряда внутри источника: $A = A_{ст}$, а

$$A_{ст} = \mathcal{E}q = \mathcal{E}It. \quad (30.6)$$

Приравняв правые части уравнений (30.5) и (30.6), получим:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}. \quad (30.7)$$

Это выражение отражает закон *Ома для полной цепи*, который гласит: *сила тока в замкнутой цепи прямо пропорциональна действующей в ней ЭДС и обратно пропорциональна сумме ее внешнего и внутреннего сопротивлений.*

Вопросы для самоконтроля

1. Какова формула закона Ома для участка цепи и как она читается?
2. От каких величин зависит сопротивление проводника? Зависит ли сопротивление проводника от температуры, а если зависит, то как это можно объяснить?
3. Какова единица измерения сопротивления?
4. Какова формула закона Ома для полной цепи и как она читается?

Пример решения задачи

Сопротивление одного из реостатов 600 Ом, а другого — 6000 Ом. Можно ли включить реостат в сеть напряжением 220 В, если первый рассчитан на ток до 250 мА, а другой — на 2 А?

Д а н о:

$R_1 = 600 \text{ Ом}$

$R_2 = 6000 \text{ Ом}$

$I_{1(\max)} = 0,25 \text{ А}$

$I_{2(\max)} = 2 \text{ А}$

$U = 220 \text{ В}$

$I_1 - ? \quad I_2 - ?$

Решение. Сила тока в реостатах при их включении в сеть равна: $I_1 = \frac{U}{R_1}$; $I_2 = \frac{U}{R_2}$.

Вычисления: $I_1 = \frac{220 \text{ В}}{600 \text{ Ом}} = 0,37 \text{ А};$

$I_2 = \frac{220 \text{ В}}{6000 \text{ Ом}} = 0,037 \text{ А}.$

Ответ: первый реостат не следует включать в сеть, так как при его включении в сети протекает ток силой 0,37 А, а он рассчитан на ток силой до 0,25 А.

Упражнение 13

1. Определите напряжение на резисторе сопротивлением 100 кОм при силе тока в нем 1 мА.
2. Сила тока в лампочке карманного фонаря равна 0,28 А при напряжении 3,5 В. Найдите сопротивление нити лампочки.
3. Изолированная медная проволока диаметром 0,8 мм намотана на катушку и включена последовательно в сеть. Определите длину проволоки, если амперметр показывает силу тока 0,6 А при напряжении 2,5 В.
4. ЭДС источника равна 4,5 В, внутреннее сопротивление — 1 Ом. Определите силу тока в цепи при сопротивлении нагрузки 8 Ом. Чему равно напряжение на нагрузке?
5. ЭДС источника 6 В. При силе тока 0,5 А напряжение на нагрузке равно 5,8 В. Вычислите внутреннее сопротивление источника.

Что освоили по этой теме?

Насколько полезна и интересна была для вас полученная информация?

Что еще вы хотели бы узнать по данной теме?

Какие вопросы возникли у вас в ходе изучения темы?

§31. Работа и мощность электрического тока

Ключевые понятия: действия тока, работа и мощность тока, закон Джоуля — Ленца.

На этом уроке вы:

изучите тепловое действие тока и законы, их описывающие.

О существовании электрического тока можно судить по его *тепловым*, *химическим* и *магнитным* действиям. Производя эти действия, электрический ток (точнее, источник электрического тока) совершает работу. Так, например, при прохождении тока проводники нагреваются, вследствие чего их внутренняя энергия возрастает. Увеличение внутренней энергии проводника происходит за счет работы тока. Определим эту работу.

Работу тока измеряют в джоулях (Дж):

$$1 \text{ Дж} = 1 \text{ А} \cdot 1 \text{ В} \cdot 1 \text{ с}.$$

При прохождении тока, т. е. при переносе заряда за счет энергии источника тока, совершается работа:

$$A = q\Delta\phi, \quad (31.1)$$

где q — перенесенный заряд; $\Delta\phi$ — разность потенциалов точек, между которыми перемещается заряд. Если участок проводника не содержит источника тока, то $\Delta\phi = U$. Тогда с учетом закона Ома для участка цепи $U = IR$ выражение (31.1) принимает следующий вид:

$$A = qIR. \quad (31.2)$$

Тепловой эффект электрического тока впервые был исследован английским физиком Дж. Джоулем. В опубликованной в 1841 г. работе Джоуль установил, что количество теплоты, выделяемое в проводнике, прямо пропорционально квадрату силы тока.

Российский ученый Э. Х. Ленц был одним из первых физиков, признавших и применивших закон Ома. В 1843 г. он установил, что выделяемое током в проводнике количество теплоты прямо пропорционально сопротивлению проводника. Поэтому закон о тепловом эффекте электрического тока вошел в историю физической науки под названием закона Джоуля — Ленца.

При постоянной силе тока I , заряд, перенесенный через поперечное сечение проводника за промежуток времени t , равен:

$$q = It. \quad (31.3)$$

Тогда количество теплоты, выделившееся в проводнике, будет равно работе электрического тока: $Q = A$ или с учетом формул (31.2) и (31.3) это равенство можем записать в следующем виде:

$$Q = I^2Rt. \quad (31.4)$$

Эта формула представляет собой закон Джоуля — Ленца, который гласит: *количество теплоты, выделяемое в проводнике с током, равно произведению квадрата силы тока, сопротивления проводника и времени прохождения по нему электрического тока.*

В большинстве обычных бытовых электроприборов указывается потребляемая ими мощность, а не ток.

Различными записями закона Джоуля — Ленца удобно пользоваться при вычислении количества теплоты, которое выделяется при различных соединениях проводников.

Используя закон Ома для участка цепи, формулу (31.4) можно представить в виде:

$$Q = IUt. \quad (31.5)$$

или

$$Q = \frac{U^2}{R} t. \quad (31.6)$$

Так как при последовательном соединении проводников сила тока везде одинакова, то количество теплоты, выделяемое в единицу времени, согласно формуле (31.4), будет больше в нагревательном элементе с большим сопротивлением.

Из формулы (31.6) следует, что при параллельном соединении нагревательных элементов количество теплоты, выделяемое в каждом нагревательном элементе в единицу времени, обратно пропорционально его сопротивлению.

Мощность электрического тока. Энергия, потребляемая в единицу времени электрическим прибором, или мощность тока является важной характеристикой любого электроприбора.

Из курса физики 8 класса вам известно, что мощность тока равна: $P = \frac{A}{t} = \frac{Q}{t}$. С учетом формул (31.4) и (31.6) получаем:

$$P = I^2 R = \frac{U^2}{R} = IU. \quad (31.7)$$

Тогда количество теплоты, выделяемое нагревательным элементом, можно записать в виде:

$$Q = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t = I U t.$$

Мощность тока измеряется в джоулях в секунду. Единицей мощности в СИ является ватт:

$$1 \text{ Вт} = 1 \text{ Дж/с.}$$

Эта единица названа в честь Джеймса Уатта (1736—1819).

Напряжение, считающееся безопасным для человека в сухом помещении, составляет до 36 В. Для сырого помещения это значение уже до 12 В.

Для предохранения от последствий короткого замыкания в цепь включают плавкие предохранители или распределительные щиты. Плавкие предохранители представляют собой тонкую металлическую проволоку, быстро перегорающую при коротком замыкании и размыкающую при этом цепь.

Применение законов постоянного тока. Современное развитие цивилизации трудно представить себе без электрического тока: он освещает квартиры и производственные помещения, приводит в движение станки, электронно-вычислительные машины, создает радиоволны и т. д.

Тепловое действие электрического тока широко применяется в различных бытовых и промышленных нагревательных приборах и установках, температура которых возрастает при прохождении по ним электрического тока. Основной частью любого нагревательного прибора является нагревательный элемент, который используется, например, в лампах накаливания, приборах измерительной техники, сварочных аппаратах и во многих других областях современной техники.

Количество теплоты, выделяемое нагревательным элементом, равно произведению мощности питательного элемента и силы тока, протекающего по нему. Следовательно, зная мощность нагревательного элемента, можно определить время, которое понадобится для нагревания, например, воды известной массы на определенное число градусов.

Заметим, что выделение теплоты в проводах, пропорциональное квадрату силы тока и сопротивлению, приводит к необходимости решения целого ряда важных технических и экономических задач. В частности, нужно обеспечить условия, при которых до потребителей доходила бы необходимая электрическая энергия, при этом потери в проводах не превышали бы допустимых норм. Вместе с тем, при прокладке сети должен быть соблюден минимальный расход металла и другие условия. Комплекс всех этих задач нельзя решать без знания основных законов постоянного тока.

Провода, выходящие из розеток на стене, проходят некоторое расстояние, прежде чем заканчиваются панелью с плавкими предохранителями или распределительным щитом. Эти провода должны быть достаточно толстыми — для того, чтобы они не нагревались и не вызывали большого напряжения в тех случаях, когда из розеток потребляется большой ток. В осветительных сетях при напряжении 220 В сила тока при коротком замыкании велика, и может произойти серьезное повреждение проводки, вплоть до возникновения пожара.

Вопросы для самоконтроля

1. За счет какой энергии совершается работа при прохождении в цепи электрического тока?
2. Как вычислить работу тока на участке цепи?
3. В каких единицах измеряют работу тока?
4. Какова формулировка закона Джоуля — Ленца?

Примеры решения задач

1. Какова напряженность поля в алюминиевом проводнике сечением $1,4 \text{ мм}^2$ при силе тока 1 А ?

Решение. Сопротивление проводника

$$R = \frac{\rho l}{S},$$

где ρ — удельное электрическое сопротивление, l — длина проводника, S — площадь его поперечного сечения. Напряжение (разность потенциалов) на длине l определяется законом Ома:

$$U = IR,$$

где I — сила тока. Следовательно, напряженность электрического поля в проводнике $E = \frac{U}{l} = \frac{I\rho}{S}$.

Вычисления:
$$E = \frac{1 \text{ А} \cdot 2,8 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{м}}{(1,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2)} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ В/м.}$$

Ответ : 20 мВ/м.

2. В бытовой электроплитке, рассчитанной на напряжение 220 В, имеются две спирали, сопротивление каждой из которых в рабочем режиме равно 80,7 Ом. С помощью переключателя в сеть можно включить одну спираль, две спирали последовательно или две спирали параллельно. Найти мощность в каждом случае.

Решение . Если R — сопротивление одной спирали, то сопротивление двух спиралей равно $2R$ (в случае последовательного соединения) и $\frac{R}{2}$ (в случае параллельного соединения).

С другой стороны, мощность тока, согласно закону Джоуля — Ленца, равна:

$$P_1 = \frac{U^2}{R},$$

при подключении одной спирали. Поэтому при последовательном соединении потребляемая мощность равна:

$$P_2 = \frac{U^2}{(2R)} = \frac{P_1}{2},$$

а при параллельном соединении:

$$P_3 = \frac{2U^2}{R} = 2P_1.$$

Вычисления: $P_1 = \frac{(220 \text{ В})^2}{80,7 \text{ Ом}} \approx 600 \text{ Вт}, P_2 = 300 \text{ Вт}, P_3 = 1200 \text{ Вт}.$

Ответ : 600 Вт, 300 Вт, 1200 Вт.

Упражнение 14

1. Какую работу за 5 мин совершает электрический ток в лампочке карманного фонаря, если напряжение на лампочке 3,5 В, а сила тока в ней 0,28 А?
2. Какое количество теплоты выделится за 10 мин в резисторе сопротивлением 1 кОм, если сила тока в нем 10 мА?
3. Какое количество теплоты выделится за 10 мин в резисторе сопротивлением 1 кОм, если его включить в цепь напряжением 100 В?
4. Два проводника с сопротивлениями 50 и 100 Ом включены в электрическую цепь последовательно. В каком из них выделится большее количество теплоты и во сколько раз?

Что освоили по этой теме?

Насколько полезна и интересна была для вас полученная информация?	Что еще вы хотели бы узнать по данной теме?	Какие вопросы возникли у вас в ходе изучения темы?

§ 32. Электрический ток в металлах

Ключевые понятия: классическая электронная теория, удельное сопротивление вещества, температурный коэффициент сопротивления, термометр сопротивления.

На этом уроке вы:

ознакомитесь с опытными подтверждениями электронной природы проводимости металлов; изучите основные положения электронной теории проводимости металлов.

Электрический ток в металлах представляет собой направленное движение электронов. Существует множество экспериментов, подтверждающих это. Приведем некоторые из них.

Опыт Э. Рикке проведен в 1901 г. Немецкий ученый составил электрическую цепь, в которую входили три тщательно отполированных цилиндра (два алюминиевых и один медный, рис. 32.1), и пропускал через них электрический ток в течение года. За это время через цилиндры прошел общий заряд порядка $3,5 \cdot 10^6$ Кл, но это не привело к изменению химического состава вещества цилиндров. По окончании

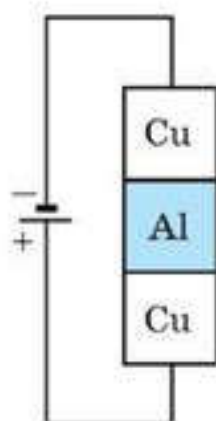


Рис. 32.1

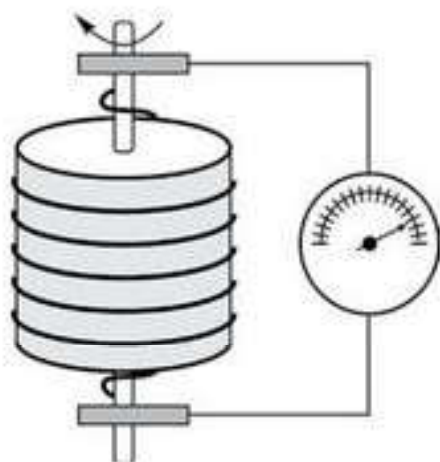


Рис. 32.2

опыта цилиндры разъединили и оказалось, что масса их практически не изменилась. Следы взаимного проникновения атомов не превышали результатов обычной диффузии в твердых телах. Значит, носителями электрического заряда являются частицы — общие для меди и алюминия электроны.

Опыт американских физиков Т. Стюарта и Р. Толмена проведен в 1916 г. катушка большого диаметра с намотанным на нее металлическим проводом приводилась во вращение с частотой 500 об/мин и резко тормозилась (рис. 32.2). При этом в ней возникал кратковременный ток, обусловленный тем, что свободные заряды продолжали некоторое время двигаться по инерции. Ток регистрировался гальванометром, присоединенным к концам проводника при помощи скользящих контактов. Стюарт и Толмен экспериментально определили удельный заряд $\frac{q_0}{m}$ частиц, переносящих ток. Он оказался равным $1,8 \cdot 10^{11}$ Кл/кг, что совпало с удельным зарядом электрона.

В начале XX в. немецкий физик П. Друде и голландский физик Х. Лоренц создали классическую электронную теорию электропроводности металлов.

Основные положения этой теории:

1. Хорошая электропроводность металлов объясняется наличием в них большого числа свободных электронов. Например, концентрация свободных электронов в меди составляет $8,4 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$. Электроны, как газ, заполняют пространство между ионами решетки, находясь в беспорядочном и непрерывном движении. Совокупность свободных электронов можно рассматривать как электронный газ, к которому применимы законы молекулярно-кинетической теории. Так была рассчитана скорость беспорядочного движения электронов в металлах, составляющая примерно 60—100 км/с. В отсутствие внешнего электрического поля полный заряд, переносимый электронами через любое сечение проводника, равен нулю, так как движение электронов хаотическое. Поэтому электрический ток отсутствует.

2. Под действием внешнего электрического поля на беспорядочное движение электронов накладывается упорядоченное движение, т. е. возникает электрический ток. Если к проводнику длиной l приложить разность потенциалов U , то внутри проводника появится электрическое поле напряженностью $E = \frac{U}{l}$. Согласно второму закону Ньютона, электроны под действием этого поля приобретут ускорение $a = \frac{eE}{m}$.

Поэтому скорость электронов через время t станет равной $v = \frac{eEt}{m}$.

После каждого столкновения электронов с ионами решетки меняется в основном направление скорости электрона, а модуль средней скорости электронного газа остается постоянной и равной $v_{\text{ср}} = \frac{eEt}{2m}$. (Почему?)

Таким образом, благодаря столкновениям с ионами решетки, электроны в металле движутся не равноускоренно, а со средней постоянной скоростью, пропорциональной приложенной силе:

$$F = eE.$$

Поэтому хаотически движущиеся электроны перемещаются в направлении, противоположном направлению поля, со средней скоростью $v_{\text{ср}}$.

3. Сила электрического тока, идущего по металлическому проводнику, как известно, определяется законом Ома для участка цепи, установленного экспериментально. Но, используя электронную теорию проводимости, П. Друде и Х. Лоренц смогли вывести его теоретически.

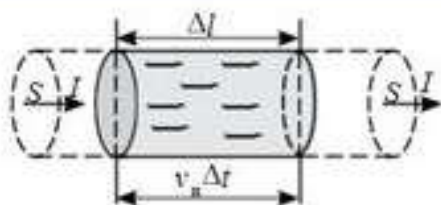


Рис. 32.3

Рассмотрим металлический проводник длиной l с концентрацией электронов n и площадью поперечного сечения S (рис. 32.3). По определению:

$$I = \frac{q}{t} = \frac{q_0 N}{t} = \frac{q_0 n V}{t} = \frac{q_0 n S l}{t} = q_0 n S v_{\text{ср}}$$

В нашем случае $q_0 = e$, поэтому

$$I = enSv_{\text{ср}} \tag{32.1}$$

Пусть начальная скорость электронов была равна нулю ($v_1 = 0$), а после того, как электроны прошли путь, равный длине свободного пробега λ , она стала равной $v_2 = at$. В этом случае среднюю скорость направленного движения электронов, вызванного действием электрического поля, можно найти так:

$$v_{\text{ср}} = \frac{(v_1 + v_2)}{2} = \frac{v_2}{2}$$

Так как $a = \frac{eE}{m}$, а $v_2 = at$, то $v_2 = \frac{eEt}{m}$.

Время между столкновениями электронов с ионами решетки равно $t = \frac{\lambda}{u}$, где λ — длина свободного пробега; u — средняя скорость беспорядочного движения электронов. Тогда $v_{\text{ср}} = \frac{eE\lambda}{2mu}$. Подставив это значение $v_{\text{ср}}$ в формулу (32.1), получим:

$$I = \frac{e^2 n S E \lambda}{2 m u} \tag{32.2}$$

Величина $\rho = \frac{2 m u}{e^2 n \lambda}$ получила название *удельное сопротивление вещества*. Так как $E = \frac{U}{l}$, то формула (32.2) переписывается так:

$$I = \frac{US}{\rho l} = \frac{U}{\frac{\rho l}{S}} = \frac{U}{R},$$

что является *математической записью закона Ома* для участка цепи. Величина R называется *сопротивлением проводника*.

4. Так как внутреннее строение у разных веществ различное, то и сопротивление тоже будет различным. Это связано с расположением ионов в кристаллической решетке и с концентрацией свободных электронов в веществе.

5. Несмотря на то, что средняя скорость направленного движения электронов в проводнике очень мала, ток в нем возникает практически мгновенно. Это связано с тем, что при подключении проводника

к источнику тока на каждый электрон проводимости начинает действовать электрическое поле, распространяющееся со скоростью света. При движении в вакууме свободные электроны не встречают никакого противодействия и приобретают кинетическую энергию за счет работы сил электрического поля. Когда же электроны движутся в веществе, то они встречают противодействие, так как взаимодействуют с ионами решетки и другими электронами, теряя при этом энергию, сообщенную им полем. За счет этого увеличивается интенсивность хаотического движения частиц вещества и происходит нагревание тела. Поэтому при прохождении тока в веществе всегда происходит увеличение его внутренней энергии. Количество теплоты, выделяющееся в металлах при прохождении по ним тока, определяется в соответствии с *законом Джоуля — Ленца*: $Q = I^2 R t$.

6. У всех металлов с увеличением температуры растет и сопротивление. Происходит это потому, что с ростом температуры возрастает интенсивность теплового (хаотического) движения электронов, а вместе с ним возрастает и число столкновений электронов друг с другом и с ионами решетки. Скорость упорядоченного движения электронов при этом уменьшается. Опыт показал, что в широком интервале температур зависимость удельного сопротивления металлов от температуры выглядит так:

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha t). \quad (32.3)$$

Зависимость удельного сопротивления металлов от температуры изображена на рисунке 32.4. Так как $R = \frac{\rho l}{S}$, то аналогично будет меняться с температурой и сопротивление проводника:

$$R = R_0 (1 + \alpha t), \quad (32.4)$$

где α — *температурный коэффициент сопротивления*; ρ_0 и R_0 — удельное сопротивление и сопротивление металлического проводника при 0°C ; ρ и R — удельное сопротивление и сопротивление проводника при температуре t .

Для чистых металлов температурные коэффициенты сопротивления мало отличаются друг от друга и приблизительно равны $0,004 \text{ K}^{-1}$ (около $1/273 \text{ K}^{-1}$). Необходимо отметить, что для металлов коэффициент α положителен, так как при нагревании их сопротивление возрастает, а для угля, электролитов и чистых полупроводников коэффициент α отрицателен, поскольку их сопротивление при нагревании уменьшается.

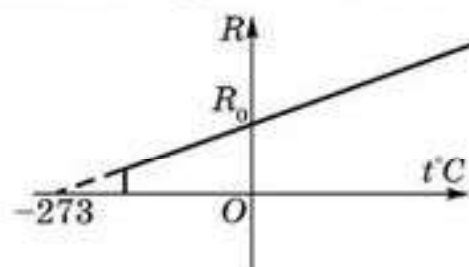


Рис. 32.4

Зависимость сопротивления металлов от температуры используется в *термометрах сопротивления*. Они позволяют измерять температуру с точностью до тысячных долей градуса (поскольку сопротивление можно измерять с высокой точностью).

Вопросы для самоконтроля

1. Почему все металлы хорошие проводники?
2. Как в металлах образуются свободные электроны?
3. Почему проводимость металлов электронная?
4. Опишите поведение свободных электронов в проводнике при отсутствии внешнего электрического поля и при его наличии.
5. Сравните величину средней скорости движения электронов в металле (скорость их теплового движения) с величиной средней скорости их упорядоченного движения, вызванной действием сил электрического поля.

Что освоили по этой теме?

Насколько полезна и интересна была для вас полученная информация?	Что еще вы хотели бы узнать по данной теме?	Какие вопросы возникли у вас в ходе изучения темы?

§33. Сверхпроводимость

Ключевые понятия: сверхпроводимость, критическая температура, высокотемпературная сверхпроводимость.

На этом уроке вы:

ознакомитесь с явлением сверхпроводимости и высокотемпературной сверхпроводимости.

Из формулы (32.4) видно, что с понижением температуры сопротивление металлов уменьшается. Нидерландский физик Х. Камерлинг-Оннес (1853—1926) в 1911 г. обнаружил явление, названное им *сверхпроводимостью*. Оказалось, что у некоторых металлов при очень низких температурах сопротивление падает скачком до нуля (рис. 33.1). Это означает, что, начиная с этой температуры, металлы перестают оказывать сопротивление электрическому току. Если из такого металла сделать кольцо и возбудить в нем ток, то он будет циркулировать в кольце бесконечно долго, так как не будет происходить потерь энергии на нагревание проводника. Самое длительное существование незатухающего тока в сверхпроводнике составило около двух лет. (Оно прекратилось только из-за забастовки транспортных рабочих, подвозивших жидкий гелий.)

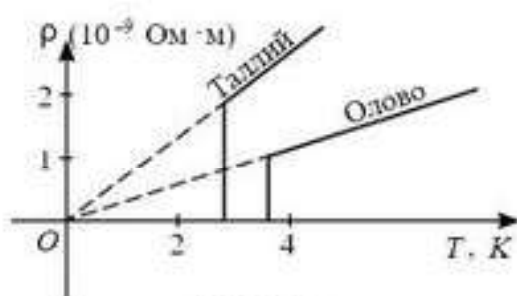


Рис. 33.1

На современном этапе сверхпроводимость обнаружена у многих металлов и сплавов. Интересно, что некоторые металлы, в том числе и самые хорошие проводники (медь, серебро, золото, платина, натрий, калий, железо, никель), не обладают сверхпроводимостью.

Теория сверхпроводимости была создана лишь в 1957 г. американцами Л. Купером, Дж. Бардином и Дж. Шриффером (ее иначе называют “теорией БКШ”). Они считали, что *сверхпроводимость — это сверхтекучесть электронной жидкости*. Свойство сверхтекучести — течь без трения — присуще квантовым жидкостям и открыто советским физиком Л. Д. Ландау (1908—1968).

Сверхтекучее состояние характерно только группе частиц, каждая из которых обладает целым *спином* — собственным магнитным полем, вызванным вращением вокруг своей оси. У электронов же спин равен $\frac{1}{2}$. Поэтому Л. Купер предположил, а затем и доказал, что в сверхпроводнике образуется “коллектив” электронов, состоящий из так называемых *куперовских пар*, в которых электроны объединяются в пары таким образом, что спины электронов направлены противоположно и их суммарный спин равен нулю. В таком состоянии многочисленные частицы движутся согласованно, и законы квантовой механики применимы в макроскопических масштабах. Столкновения отдельных электронов с ионами кристаллической решетки становятся невозможными, и затормозить такой “коллектив” электронов не так-то просто. Энергия этой квантовой системы может меняться только скачком, поэтому сверхпроводящие пары электронов могут до определенной скорости двигаться в металле без трения.

Сверхпроводящее состояние можно изменить, преобразовав кристаллическую структуру или добавив примесей. Магнитное поле совсем разрушает это состояние, причем при разных температурах величина этого разрушающего поля различна. *При определенных температурах, называемых критическими, даже ничтожно малое магнитное поле ломает сверхпроводящие свойства. На сверхпроводимость сильно влияют размеры тела.*

В 1933 г. было установлено, что *сверхпроводящий ток — это поверхностный ток*.

Сверхпроводимость позволяет получать в металлических проводниках небольшого сечения огромные токи при низких температурах. Поэтому из сверхпроводников изготавливают обмотки мощных электрических генераторов и электромагнитов, которые охлаждают жидким гелием.

В 1986 г. была открыта *высокотемпературная сверхпроводимость*. Были получены сложные оксидные соединения лантана, бария и других элементов с температурой перехода в сверхпроводящее состояние

около 100 К. Полученные сверхпроводящие образцы оказались очень хрупкими. При обработке они разрушались и превращались в порошок. Перед физикой сверхпроводников стоит задача не только поиска сверхпроводящих материалов, но и выборки у них высокотехнологичных свойств.

Вопросы для самоконтроля

1. Объясните, почему с ростом температуры сопротивление металлов возрастает?
2. Какое явление называется *сверхпроводимостью*? Кем оно было открыто?
3. Как объяснить явление сверхпроводимости?

Что освоили по этой теме?

Насколько полезна и интересна была для вас полученная информация?	Что еще вы хотели бы узнать по данной теме?	Какие вопросы возникли у вас в ходе изучения темы?
---	---	--

§ 34. Электрический ток в полупроводниках

Ключевые понятия: проводники, полупроводники и диэлектрики, ковалентная связь, электронная и дырочная проводимости, собственная проводимость полупроводников, донорная примесь, акцепторная примесь, примесная проводимость полупроводников, полупроводники *n*- и *p*-типа.

На этом уроке вы:

узнаете, как ковалентная связь между атомами формирует кристаллическую структуру полупроводников; узнаете, что проводимость полупроводников делится на собственную и примесную; ознакомитесь со свойствами электронно-дырочного перехода.

Проводники, диэлектрики, полупроводники. Все вещества по электропроводности можно разделить на три класса: *проводники* — вещества, хорошо проводящие ток [$\rho = (10^{-5} - 10^{-8}) \text{ Ом} \cdot \text{м}$]; *диэлектрики* — вещества, плохо проводящие ток [$\rho = (10^8 - 10^{17}) \text{ Ом} \cdot \text{м}$] и *полупроводники* — вещества, проводимость которых оказалась промежуточной между проводниками и диэлектриками [$\rho = (10^4 - 10^{-5}) \text{ Ом} \cdot \text{м}$] (рис. 34.1).

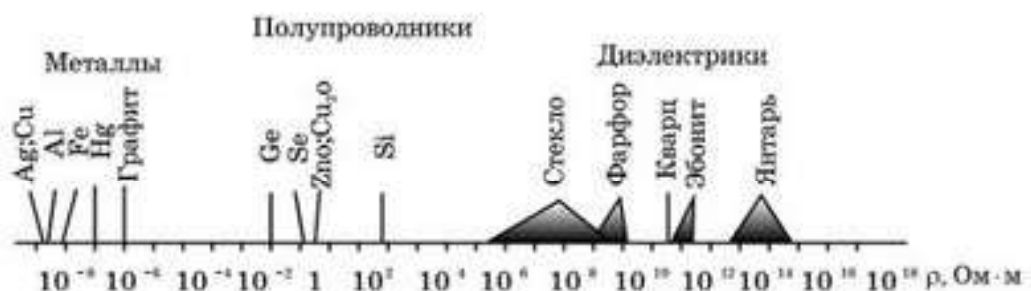


Рис. 34.1

Хорошая проводимость проводников объясняется наличием в них большого числа свободных носителей заряда. Но присутствие в проводниках примесей увеличивает их сопротивление. Происходит это потому, что примеси сильно влияют на подвижность свободных носителей заряда, несмотря на то, что их концентрация практически не изменяется.

Диэлектрики плохо проводят электрический ток, потому что в них практически отсутствуют свободные заряды. Если в диэлектрике имеются примеси, то обычно их электроны слабо связаны со своими атомами. Поэтому они легко отрываются от атомов, переходя в свободное состояние, что приводит к уменьшению сопротивления диэлектрика.

К классу полупроводников относятся вещества с ковалентной связью. Ковалентная связь между четырьмя соседними атомами образуется за счет объединения или своих валентных электронов. То есть в образовании этой связи от каждого атома участвует по одному валентному электрону, которые образуют электронную пару. Эти “обобществленные” электроны большую часть времени находятся в пространстве между соседними атомами. Структура этой связи приведена на рисунке 34.2. Необходимо отметить, что “коллективная” пара электронов принадлежит лишь двум атомам. Каждый атом образует четыре связи с соседними атомами, а данный валентный электрон может двигаться по любой из них. Дойдя до соседнего атома, он может перейти к нему, затем — к следующему и так по всему кристаллу. Поэтому можно сказать, что “коллективные” валентные электроны принадлежат всему кристаллу.

При низкой температуре ковалентная связь достаточно прочная (валентные электроны прочно привязаны к кристаллической решетке), и поэтому в данных условиях полупроводник ведет себя как диэлектрик. Внешнее электрическое поле не в состоянии обеспечить направленное движение электронов.

Нам известно, что при сверхпроводимости у металлов сопротивление при нагревании возрастает, а при охлаждении уменьшается и становится равным нулю. Сопротивление диэлектриков при нагревании уменьшается, но остается большим. В диэлектрике для отрыва электронов от атомов нужна большая энергия, поэтому твердые диэлектрики успевают расплавиться прежде, чем приобретут достаточно большую проводимость.

У полупроводников энергия, необходимая для отрыва электрона от атома, значительно меньше, чем у диэлектриков. Поэтому при нагревании полупроводников количество

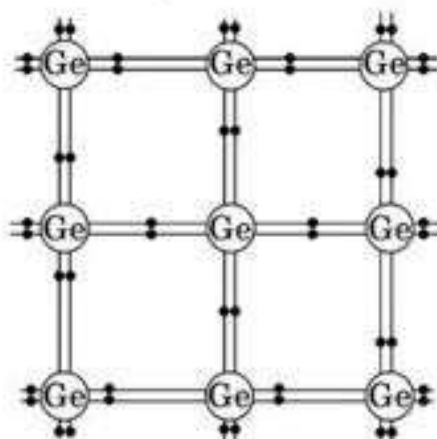


Рис. 34.2

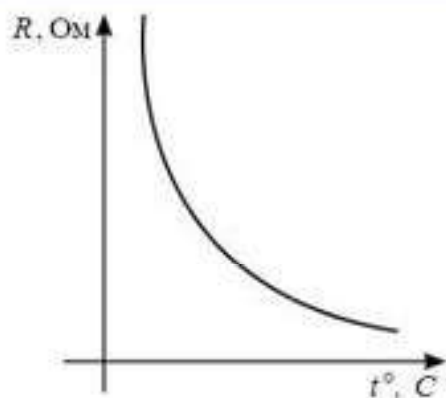


Рис. 34.3

свободных носителей зарядов в них быстро увеличивается, а их сопротивление сильно уменьшается (рис. 34.3). График зависимости сопротивления полупроводников от температуры представлен на рисунке 34.3. При низких температурах сопротивление полупроводников соизмеримо с сопротивлением диэлектриков, так как в них практически отсутствуют свободные носители заряда. Понятно, что явление сверхпроводимости у полупроводников отсутствует. Необходимо отметить и то, что их сопротивление сильно уменьшается при освещении, так как излучение приносит энергию, достаточную для образования подвижных носителей заряда.

Итак, *проводимость полупроводников сильно зависит от температуры и освещенности*. Эти особенности обеспечивают их широкое применение.

Собственная и примесная проводимость полупроводников. Мы уже показали, что с повышением температуры электроны в полупроводниках покидают свои связи, и в полупроводниках появляются свободные носители заряда. Ими являются *свободные электроны* и *дырки* — свободные места в нарушенной ковалентной связи. В дырке имеется избыточный положительный заряд по сравнению с остальными связями (рис. 34.4). Положение дырки в кристалле не остается неизменным. Постоянно происходит перескок электронов, обеспечивающих связь на месте образовавшейся дырки. Таким образом, благодаря перемещению электронов связи происходит перемещение дырок по кристаллу. *Проводимость, образованная перемещением свободных электронов в кристалле, получила название электронная проводимость*, а *проводимость, образованная перемещением дырок, стала называться дырочной*. В чистом полупроводнике

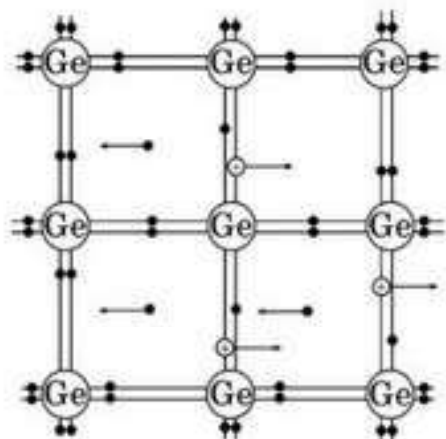


Рис. 34.4

всегда имеется равное количество свободных электронов и дырок. Поэтому *проводимость чистых полупроводников наполовину дырочная, а наполовину — электронная*. Такая *проводимость называется собственной проводимостью полупроводников*.

С помощью добавления в чистый полупроводник специально подобранных примесей можно искусственно приготовить такие полупроводники, которые обладают преимущественно электронной или дырочной проводимостью.

Добавим в чистый расплавленный германий около 10^{-5} % примеси, состоящей из атомов какого-либо элемента V группы таблицы Менделеева, например, мышьяка. Тогда при затвердевании образуется обычная решетка германия, но в некоторых узлах вместо атомов этого элемента будут находиться атомы мышьяка (рис. 34.5). Четыре валентных электрона атома мышьяка при этом образуют ковалентные связи с соседними атомами германия, а пятый электрон в этих условиях оказывается настолько слабо связанным с атомом мышьяка, что для его отрыва нужна очень маленькая энергия, значительно меньше той, которая необходима для ионизации атомов полупроводника.

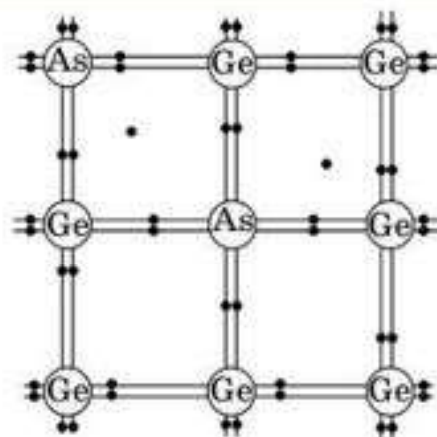


Рис. 34.5

Поэтому при обычной температуре все атомы мышьяка в полупроводнике оказываются ионизированными. Положительно заряженные атомы мышьяка связаны с решеткой (*локализованы*) и не могут перемещаться под действием внешнего электрического поля, а свободные электроны (по одному от каждого атома примеси) являются подвижными носителями зарядов. Проводимость такого кристалла будет преимущественно электронной. Ее называют *проводимостью n-типа* (от *negativ* — “отрицательный”), а сам кристалл — *полупроводником n-типа*. *Примесь, создающую в полупроводнике свободные электроны, называют донорной (дающей), или примесью n-типа.*

Если в чистый германий добавить атомы элементов III группы таблицы Менделеева, например, индия, у которого имеется по три валентных электрона, то этих электронов хватит для установления ковалентной связи с тремя соседними атомами германия. Для установления связи с четвертым атомом германия атом индия заимствует электрон у одного из своих соседей и превращается в отрицательный ион, а у одного из атомов германия возникает дырка, которая хаотически движется по кристаллу (рис. 34.6). У кристаллов германия с примесью атомов элементов III группы проводимость преимущественно дырочная. Ее называют *проводимостью p-типа* (от *positiv* — “положительный”). *Примесь, создающую проводимость p-типа, называют акцепторной (принимающей), или примесью p-типа.*

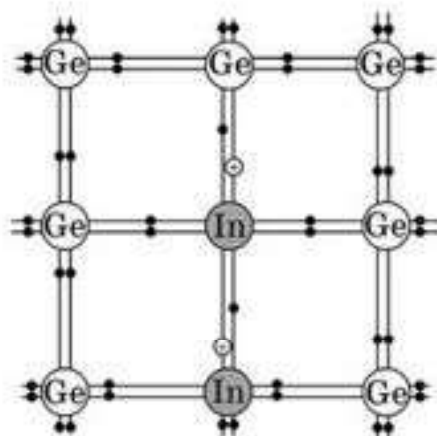


Рис. 34.6

В примесных полупроводниках уже при обычных температурах происходит образование пар “электрон — дырка”. Поэтому помимо

основных носителей тока там имеются в небольшом количестве и носители тока противоположного знака (неосновные носители тока). При невысоких температурах неосновные носители тока существенной роли в электропроводности не играют. Однако при высоких температурах, когда происходит интенсивное образование пар “электрон—дырка”, полупроводник приобретает смешанную проводимость. Таким образом, преимущественно дырочная, или электронная, проводимость у полупроводников сохраняется лишь при температурах ниже той, при которой начинает играть существенную роль собственная проводимость полупроводника.

Электронно-дырочный переход. В любом полупроводниковом приборе имеется один или несколько электронно-дырочных переходов. **Электронно-дырочный переход** (или $p - n$ -переход) — это область контакта двух полупроводников с разными типами проводимости.

В полупроводнике n -типа основными носителями свободного заряда являются электроны; их концентрация значительно превышает концентрацию дырок ($n_n \gg n_p$). В полупроводнике p -типа основными носителями являются дырки ($n_p \gg n_n$). При контакте двух полупроводников n - и p -типов начинается процесс диффузии: дырки из p -области переходят в n -область, а электроны, наоборот, из n -области — в p -область. В результате в n -области вблизи зоны контакта уменьшается концентрация электронов и возникает положительно заряженный слой. В p -области уменьшается концентрация дырок и возникает отрицательно заряженный слой. Таким образом, на границе полупроводников образуется двойной электрический слой, электрическое поле которого препятствует процессу диффузии электронов и дырок (рис. 34.7, а). Пограничная область раздела полупроводников с разными типами проводимости (ее называют *запирающим слоем*) обычно достигает толщины порядка десятков или сотен межатомных расстояний. Объемные заряды этого слоя создают между p - и n -областями *запирающее напряжение* U_z , приблизительно равное 0,35 В для германиевых $n - p$ -переходов и 0,6 В — для кремниевых полупроводников. А $n - p$ -переход обладает свойством односторонней проводимости.

Если полупроводник с $n - p$ -переходом подключен к источнику тока так, что положительный полюс источника соединен с n -областью, а отрицательный — с p -областью (рис. 34.7, б), то напряженность поля в запирающем слое возрастает. Дырки в p -области и электроны в n -области будут смещаться от $n - p$ -перехода, увеличивая тем самым концентрации неосновных носителей в запирающем слое. Ток через $n - p$ -переход практически не идет. Напряжение, поданное на $n - p$ -переход, в этом случае называют *обратным*. Незначительный обратный ток обусловлен только собственной проводимостью полупроводника, т. е.

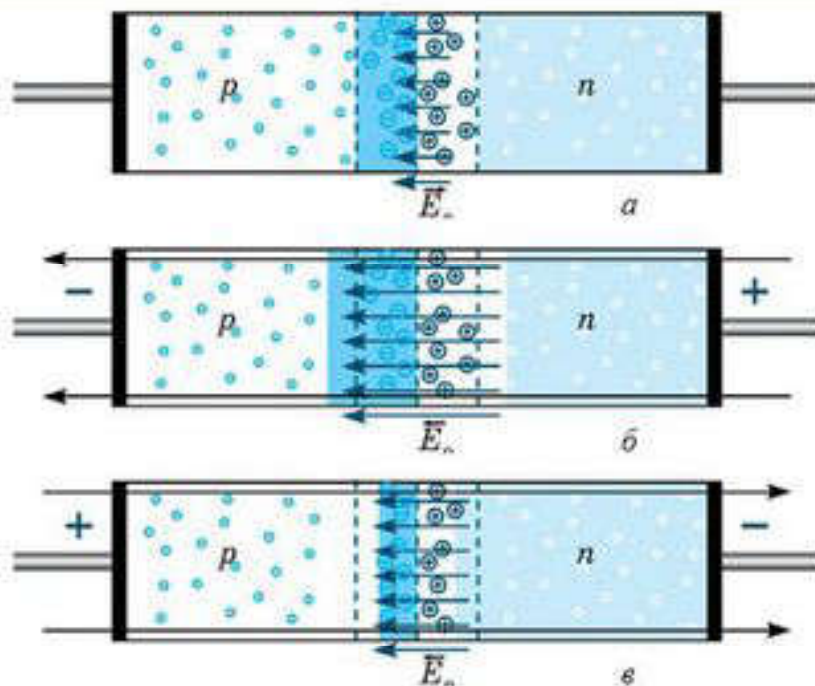


Рис. 34.7

наличием небольшой концентрации свободных электронов в p -области и дырок в n -области.

Если $n - p$ -переход соединить с источником так, чтобы положительный полюс источника был соединен с p -областью, а отрицательный — с n -областью (рис. 34.7, $б$), то напряженность электрического поля в запирающем слое будет уменьшаться, что облегчает переход основных носителей через контактный слой. Дырки из p -области и электроны из n -области, двигаясь навстречу друг другу, будут пересекать $n - p$ -переход, создавая ток в **прямом направлении**. Сила тока через $n - p$ -переход в этом случае будет возрастать при увеличении напряжения источника.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие вещества относятся к классу полупроводников?
2. Как зависит сопротивление полупроводников от температуры?
3. Какая связь называется *ковалентной* ?
4. Что происходит в полупроводнике при его нагревании?
5. Что называется в проводниках *дыркой* ?
6. Какая проводимость называется *собственной* ?
7. Какие примеси называются *донорными* ?
8. Какие примеси называются *акцепторными* ?
9. Какая проводимость называется *примесной* ?
10. Какой полупроводник называют *полупроводником n-типа* ?
11. Какой полупроводник называют *полупроводником p-типа* ?
12. Что такое *электронно-дырочный переход* ?
13. Какими свойствами обладает электронно-дырочный переход?

Что освоили по этой теме?

Насколько полезна и интересна была для вас полученная информация?

Что еще вы хотели бы узнать по данной теме?

Какие вопросы возникли у вас в ходе изучения темы?

§ 35. Полупроводниковые приборы

Ключевые понятия: полупроводниковый диод, полупроводниковый транзистор, эмиттер, база, коллектор, интегральная микросхема.

На этом уроке вы:

узнаете, как работает полупроводниковый диод; рассмотрите вольт-амперную характеристику диода и применение полупроводниковых приборов.

Полупроводниковый диод. Способность $n - p$ -перехода пропускать ток практически только в одном направлении используется в *полупроводниковых диодах*. Их изготавливают из кристаллов кремния или германия. Для этого в кристалл с каким-либо типом проводимости вводят примесь, обеспечивающую другой тип проводимости. Полупроводниковые диоды используются в выпрямителях для преобразования переменного тока в постоянный. На рисунке 35.1 приведена типичная вольт-амперная характеристика кремниевого диода.

Полупроводниковые диоды обладают многими преимуществами по сравнению с вакуумными диодами: малые размеры, длительный срок службы, механическая прочность. Существенным недостатком полупроводниковых диодов является зависимость их параметров от температуры. Кремниевые диоды, например, могут удовлетворительно работать только в диапазоне температур от -70 до $+80^\circ\text{C}$. У германиевых диодов диапазон рабочих температур несколько шире.

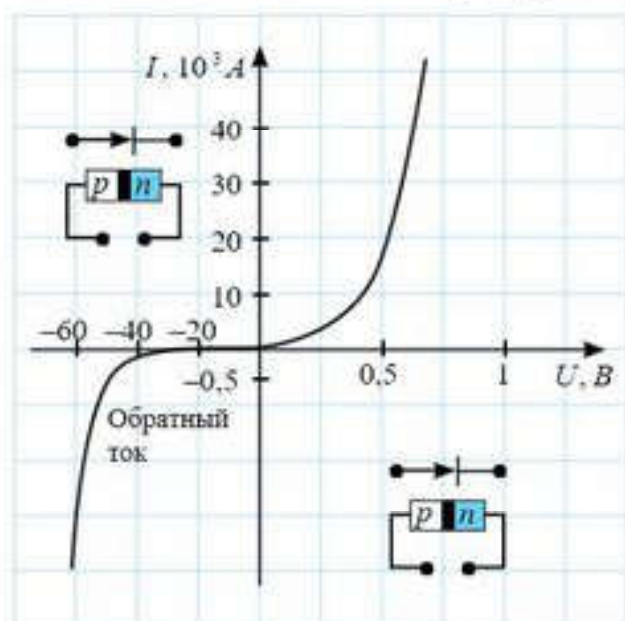


Рис. 35.1

Полупроводниковый транзистор. Полупроводниковые приборы не с одним, а с двумя $n - p$ -переходами называются *транзисторами* (от сочетания английских слов: *transfer* — “переносить” и *resistor* — “сопротивление”). Обычно для создания транзисторов используют германий и кремний. Транзисторы бывают двух типов: $p - n - p$ -транзисторы и $n - p - n$ -транзисторы. Например, германиевый транзистор $p - n - p$ -типа представляет собой

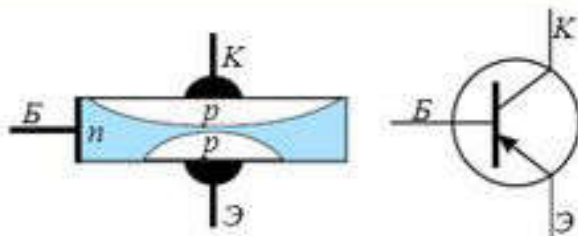


Рис. 35.2

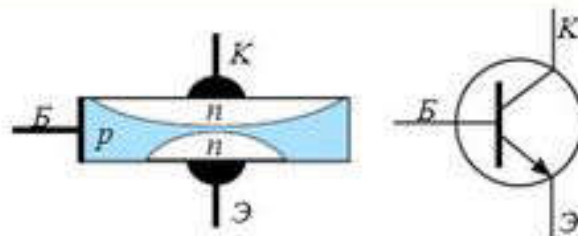


Рис. 35.3

небольшую пластинку из германия с донорной примесью, т. е. из полупроводника n -типа. В этой пластинке создаются две области с акцепторной примесью, т. е. области с дырочной проводимостью (рис. 35.2). В транзисторе $n-p-n$ -типа основная германиевая пластинка обладает проводимостью p -типа, а созданные на ней две области — проводимостью n -типа (рис. 35.3).

Пластинку транзистора называют *базой* (Б), одну из областей с противоположным типом проводимости — *коллектором* (К), а вторую — *эмиттером* (Э). Обычно объем коллектора превышает объем эмиттера. В условных обозначениях разных структур стрелка эмиттера показывает направление тока через транзистор.

Оба $n-p$ -перехода транзистора соединяются с двумя источниками тока. На рисунке 35.4 показано включение в цепь транзистора $p-n-p$ -структуры. Переход “эмиттер — база” включается в прямом (пропускном) направлении (*цепь эмиттера*), а переход “коллектор — база” — в запирающем направлении (*цепь коллектора*).

Пока цепь эмиттера разомкнута, ток в цепи коллектора очень мал, так как для основных носителей свободного заряда — электронов в базе и дырок в коллекторе — переход заперт.

При замыкании цепи эмиттера дырки, которые являются основными носителями заряда в эмиттере, переходят из него в базу, создавая в этой цепи ток I_E . Но для дырок, попавших в базу из эмиттера, $n-p$ -переход в цепи коллектора открыт. Большая часть дырок “захватывается” полем этого перехода и проникает в коллектор, создавая ток I_K . Для того чтобы ток коллектора был практически равен току эмиттера, базу

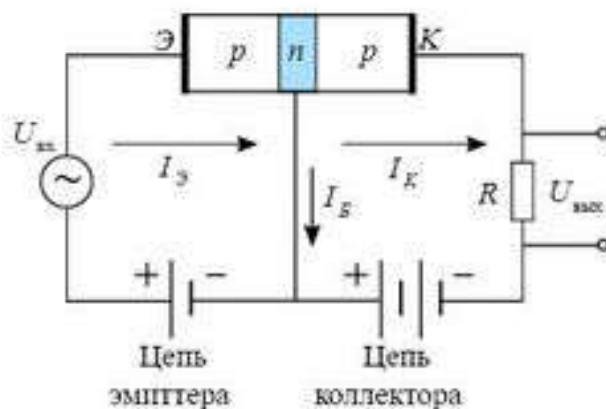


Рис. 35.4

транзистора делают в виде очень тонкого слоя. При изменении тока в цепи эмиттера изменяется сила тока и в цепи коллектора.

Если в цепь эмиттера включить источник переменного напряжения (рис. 35.4), то на резисторе R , включенном в цепь коллектора, также возникает переменное напряжение, амплитуда которого может во много раз превышать амплитуду входного сигнала. Это означает, что транзистор выполняет роль усилителя переменного напряжения.

Однако, такая схема усилителя на транзисторе является неэффективной, так как в ней отсутствует усиление сигнала по току, и через источник входного сигнала протекает весь ток эмиттера $I_{\text{э}}$. В реальных схемах усилителей на транзисторах источник переменного напряжения включают так, чтобы через него протекал только небольшой ток базы $I_{\text{б}} = I_{\text{э}} - I_{\text{к}}$. Малые изменения тока базы вызывают значительные изменения тока коллектора.

Применение полупроводниковых приборов. В настоящее время полупроводниковые приборы находят исключительно широкое применение в радиоэлектронике. Современная технология позволяет производить полупроводниковые приборы — диоды, транзисторы, полупроводниковые фотоприемники и т. д. — размером в несколько микрометров. Новым этапом электронной техники явилось развитие *микрорелектроники*, которая занимается разработкой интегральных микросхем и принципов их применения.

Интегральной микросхемой называют совокупность большого числа взаимосвязанных элементов — сверхмалых диодов, транзисторов, конденсаторов, резисторов, соединительных проводов, изготовленных в едином технологическом процессе на одном кристалле. Микросхема размером 1 см может содержать несколько сотен тысяч микроэлементов. Благодаря этому произошли огромные изменения во многих областях современной электронно-вычислительной техники, космической связи и др.

Вопросы для самоконтроля

1. Как устроен и работает полупроводниковый диод? Где он применяется?
2. Как выглядит вольт-амперная характеристика полупроводникового диода? Объясните характер этой кривой.
3. Как устроен и работает транзистор? Где он применяется?
4. На чем основана работа базы, эмиттера и коллектора?

Что освоили по этой теме?

Насколько полезна и интересна была для вас полученная информация?	Что еще вы хотели бы узнать по данной теме?	Какие вопросы возникли у вас в ходе изучения темы?

§ 36. Электрический ток в электролитах

Ключевые понятия: электролитическая диссоциация, электролит, анион, катион, электролиз, первый и второй законы Фарадея для электролиза, электрохимический эквивалент вещества, химический эквивалент вещества, гальваностегия.

На этом уроке вы:

узнаете, как происходит электролитическая диссоциация; узнаете, что называют *электролитом*; изучите законы Фарадея для электролиза; научитесь применять законы электролиза при решении задач.

Электролитическая диссоциация. Рассмотрим прохождение электрического тока через растворы кислот, солей и щелочей. Чистая дистиллированная вода практически диэлектрик. Это можно доказать с помощью следующего опыта: если последовательно соединить с лампой накаливания ванну с дистиллированной водой, в которую опущены металлические пластины, и подключить лампу и ванну к сети, то лампа гореть не будет. Оказывается, раствор сахара в воде тоже не проводит тока. Если же с помощью пипетки ввести в ванну с водой несколько капель кислоты, то лампа ярко загорается. Значит, раствор кислоты в воде — хороший проводник тока. Рассмотрим причины этих явлений.

Молекулы воды являются природными диполями. Допустим, что в воде находится молекула соляной кислоты HCl . Она состоит из иона H^+ и иона Cl^- , которые удерживаются кулоновской силой притяжения. Вода сильно ослабляет электрическое взаимодействие зарядов (примерно в 80 раз), и хаотически движущиеся молекулы воды ударяют со всех сторон молекулу соляной кислоты; в результате этого молекула HCl распадается на ионы. Диполи воды окружают молекулу кислоты и как бы “растаскивают” ее на ионы (рис. 36.1). Находящиеся в воде разноименно заряженные ионы притягиваются и при встрече могут снова образовать молекулу. Поэтому, когда кислота попадает в воду, происходит не только процесс распада молекул на ионы, но и обратный процесс образования нейтральных молекул из ионов:

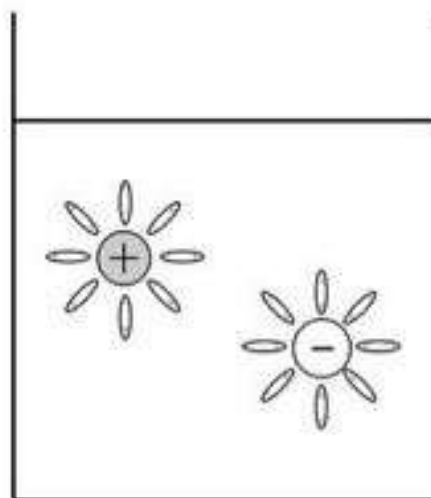


Рис. 36.1



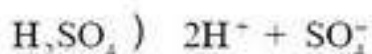
(стрелки показывают, что процесс протекает в обоих направлениях).

Распад молекул на ионы под действием растворителя называют электролитической диссоциацией. Число, показывающее, какую часть всех молекул растворенного вещества составляют молекулы, распавшиеся на ионы, называется степенью диссоциации.

Процесс воссоединения ионов в нейтральную молекулу называется рекомбинацией .

Итак, подвижными носителями зарядов в растворах являются только ионы . При диссоциации ионы водорода и всех металлов оказываются заряженными положительно. Ионы в растворе часто представляют собой группу из нескольких атомов. Диссоциацию молекул на ионы может вызвать не только растворитель. Например, при сильном нагревании вещества его молекулы, состоящие из ионов, могут диссоциировать на отдельные ионы. Поэтому расплавы солей являются проводниками электрического тока.

Электролиз. Выясним подробнее, как проходит ток через раствор, в котором имеются подвижные ионы. *Жидкий проводник, в котором подвижными носителями зарядов являются только ионы, называют электролитом .* Пусть в ванну налит раствор серной кислоты. Происходит диссоциация молекул серной кислоты, характеризующаяся следующим уравнением:



Опустим в ванну платиновые пластины и соединим их через амперметр с батареей. Эти пластины называются *электродами* . Электрод, соединенный с положительным полюсом батареи, называют *анодом* , электрод, соединенный с отрицательным полюсом, — *катодом* . Если замкнуть цепь ключом, то в электролите между электродами возникает электрическое поле. Под действием сил этого поля ионы водорода H^+ устремятся к катоду, а ионы кислотного остатка — к аноду. Дойдя до катода, ионы H^+ присоединяют к себе один из свободных электронов платины и превращаются в нейтральные атомы водорода. Соединяясь попарно, эти атомы образуют молекулы газообразного водорода, который и выделится на катоде.

Из описанного выше видно, что прохождение электрического тока через электролиты сопровождается превращением вещества, т. е. ток в электролитах производит химическое действие. *При прохождении электрического тока через электролит на электродах выделяется вещество из-за окислительно-восстановительных реакций. Это явление называется электролизом . Сосуд с электродами, в котором находится электролит , называют электролитической ванной . Положительные ионы в растворе называют катионами (так как они при электролизе идут к катоду), а отрицательные ионы называют анионами . Катионами являются ионы водорода и металлов.*

Ток в электролите подчиняется закону Ома, т. е. изменяется прямо пропорционально напряжению. При нагревании электролитов уменьшается их вязкость, и в них возрастает подвижность ионов. Кроме того, при нагревании электролита возрастает степень диссоциации молекул

растворенного вещества, т. е. увеличивается количество носителей тока в электролите. Это означает, что сопротивление электролитов при нагревании уменьшается.

Количество вещества, выделяющегося при электролизе. Первый закон Фарадея. Явление электролиза было изучено М. Фарадеем. Измеряя пропущенный через раствор заряд и массу катода до и после электролиза, Фарадей установил, что *масса вещества, выделяющегося при электролизе, прямо пропорциональна количеству электричества, протекающего через раствор* :

$$m = kq. \quad (36.1)$$

Формула (36.1) является *математическим выражением первого закона Фарадея*.

Опыты Фарадея показали, что масса выделенного при электролизе вещества зависит не только от величины заряда q , но и от рода вещества. Коэффициент пропорциональности k , выражающий зависимость массы выделенного при электролизе вещества от его рода, называется *электрохимическим эквивалентом вещества*. *Электрохимический эквивалент — это физическая величина, характеризующая массой вещества, выделяющегося на электроде при прохождении через электролит единичного заряда* :

$$k = \frac{m}{q}. \quad (36.2)$$

В СИ единицей электрохимического эквивалента k является **1 кг/Кл**.

Поскольку $q = It$, то *первый закон Фарадея* можно записать следующим образом:

$$m = kIt. \quad (36.3)$$

Опыты позволяют определить электрохимические эквиваленты с большой точностью. В свое время это позволило использовать формулу (36.3) для определения величины заряда 1 Кл по электрохимическому эквиваленту серебра, который был измерен особенно тщательно и оказался равным $1,118 \cdot 10^{-6}$ кг/Кл = 1,118 мг/Кл.

Второй закон Фарадея. Вспомним, что *масса одного моля ионов (в граммах) равна относительной молекулярной массе одного иона* :

$$M = M_r \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль.}$$

Частное от деления молярной массы ионов на их валентность (M/n) называют *химическим эквивалентом* этих ионов. Так, относительная атомная масса меди — 63,54, а валентность ее ионов равна 2. Тогда молярная масса меди равна 63,54 г/моль, а ее химический эквивалент равен:

$$\frac{63,54}{2} \text{ г/моль} = 31,77 \text{ г/моль} = 31,77 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль.}$$

В результате своих опытов Фарадей нашел, что для выделения на электроде одного химического эквивалента ионов любого вида нужно пропустить через электролит одинаковый заряд. Этот заряд принято называть **постоянной Фарадея** и обозначать символом F :

$$F = 9,65 \cdot 10^4 \text{ Кл/моль.}$$

Следовательно, **общий заряд всех ионов, составляющих один химический эквивалент, равен F .**

Если при электролизе на электроде выделилось вещество массой m , а химический эквивалент составляет $\frac{M}{n}$, то отношение массы m вещества, выделившегося на электроде, к химическому эквиваленту вещества $\frac{M}{n}$, выражает число выделенных химических эквивалентов. Если при этом через раствор прошел заряд q , то отношение этого заряда q к числу Фарадея F тоже есть число химических эквивалентов, выделенных при электролизе:

$$\left(\frac{m}{\frac{M}{n}}\right) = \frac{q}{F}.$$

Отсюда

$$m = \left(\frac{M}{nF}\right)q. \quad (36.4)$$

Сравнивая формулы (36.1) и (36.4), получим:

$$k = \frac{1}{F} \cdot \frac{M}{n}. \quad (36.5)$$

Формула (36.5) является **математическим выражением второго закона Фарадея**: **электрохимические эквиваленты различных веществ прямо пропорциональны их химическим эквивалентам.** Формула (36.4) выражает **объединенный закон Фарадея для электролиза**.

Использование электролиза в технике. Электролиз широко применяется в технике. Его используют для очистки от посторонних примесей металлов, полученных при выплавке из руды. С помощью электролиза из расплавленной руды извлекают легкие металлы, которые реагируют с водой и из растворов в воде не выделяются. Таким способом получают алюминий, натрий, литий и т. д. Цинк и никель получают **электрострикцией**, т. е. извлекают металл из раствора с помощью электролиза. Атомарный кислород, выделяющийся при электролизе, является сильным окислителем и используется при изготовлении различных лекарств.

С помощью электролиза производят покрытие металлических элементов тонким слоем другого металла, не окисляющегося на воздухе, что предохраняет изделия из металла от коррозии. Такой способ обработки поверхности называется **гальваностегией**. Примерами ее

являются *никелирование* и *хромирование*. Гальваностегию применяют для изготовления украшений, например, при серебрении и золочении.

Вопросы для самоконтроля

1. Какое явление называется *электролитической диссоциацией*? Каков его механизм?
2. Что называют *степенью диссоциации*?
3. Какое явление называется *рекомбинацией*?
4. Почему проводимость жидкостей ионная?
5. Что называют *электролитом*?
6. Какое явление называется *электролизом*? Как оно происходит?
7. Сформулируйте первый закон электролиза Фарадея.
- *8. Какая величина называется *электрохимическим эквивалентом*? Каков ее физический смысл?
9. Сформулируйте второй закон электролиза Фарадея.
- *10. Какая величина называется *химическим эквивалентом*? Каков ее физический смысл?
11. Какая величина называется *постоянной Фарадея*? В чем ее физический смысл?
12. Приведите примеры использования электролиза в технике.

Что освоили по этой теме?

Насколько полезна и интересна была для вас полученная информация?	Что еще вы хотели бы узнать по данной теме?	Какие вопросы возникли у вас в ходе изучения темы?

§ 37. Электрический ток в газах

Ключевые понятия: ионизация газа, самостоятельный и несамоостоятельный газовый разряды, ударная ионизация, вторичная электронная эмиссия, тлеющий разряд, дуговой разряд, искровой разряд, коронный разряд, плазма.

На этом уроке вы:

узнаете, что такое *ионизация газа* и как она протекает; изучите вольт-амперную характеристику газового разряда; узнаете, что газовый разряд бывает несамоостоятельным и самостоятельным; изучите механизм возникновения самостоятельного газового разряда; рассмотрите различные виды газового разряда; ознакомьтесь с новым состоянием вещества — плазмой.

Ионизация газа. Ионная и электронная проводимость газа. Все газы в обычных условиях являются хорошими изоляторами, однако, в ограниченном пространстве газы, в том числе воздух, можно сделать проводниками. Для этого нужно искусственно создать в них подвижные носители зарядов, т. е. ионизировать молекулы газа.

Установить это можно с помощью следующего опыта. Возьмем большой плоский конденсатор, раздвинем его пластины и присоединим их

к источнику напряжения в несколько тысяч вольт. Чувствительный гальванометр покажет нам, что тока в цепи нет, хотя между пластинами имеется электрическое поле. Это означает, что в воздухе между пластинами свободных зарядов или совсем нет, или так мало, что гальванометр не реагирует на их перемещение. Далее мы увидим, что правильным является второе утверждение.

Установим между пластинами горящую свечу или направим туда пучок рентгеновских лучей. При этом стрелка гальванометра отклонится, т. е. по цепи пойдет ток. Значит, в воздухе произошла *ионизация молекул (появились подвижные носители зарядов)*. Если убрать ионизатор, то ток быстро исчезает, так как воздух между пластинами опять становится изолятором. На основании опытов подобного рода было установлено, что *ионизаторами газа могут быть: высокая температура; излучения: рентгеновское, ультрафиолетовое, α -излучение и т. д.*

В газе наряду с ионизацией всегда протекает и обратный процесс — *рекомбинация ионов*, т. е. образование нейтральных молекул из ионов газа. При ионизации от молекулы газа отрывается один из валентных электронов. Часть таких электронов присоединяется к нейтральным молекулам газа, образуя отрицательные ионы, часть остается в свободном состоянии. Таким образом, *подвижными носителями заряда в ионизированном газе являются свободные электроны и ионы (как положительные, так и отрицательные)*. Поэтому *проводимость ионизированного газа оказывается частично ионной и частично электронной*.

Зависимость силы тока в газе от напряжения. Используя большое напряжение на пластинах конденсатора и измеряя гальванометром силу тока I , можно получить зависимость силы тока в газе от напряжения (т. е. вольт-амперную характеристику газового промежутка) при действии постоянного ионизатора (рис. 37.1). На этом графике видно, что *только при небольших напряжениях ток в газе подчиняется закону Ома*. Выясним, почему так происходит.

Когда напряжение между пластинами невелико, носители тока под действием электрического поля движутся медленно и в большинстве

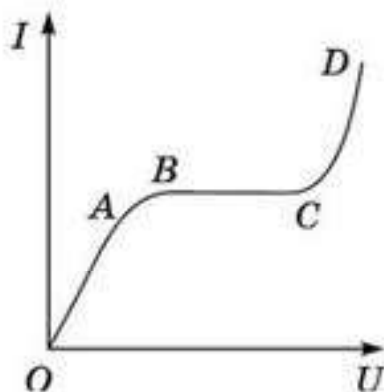


Рис. 37.1

случаев успевают рекомбинировать, не дойдя до пластин. При увеличении напряжения растет скорость движения ионов под действием поля, а вероятность их рекомбинации уменьшается. Поэтому за единицу времени все больше ионов успевают дойти до пластин и нейтрализоваться на них, т. е. ток усиливается. Итак, на участке *OA* ток возрастает за счет ослабления рекомбинации подвижных носителей зарядов в газе (рис. 37.1).

Если напряжение на пластинах будет и далее повышаться, то наступит момент, когда рекомбинация носителей тока практически совсем прекратится, а сила тока достигнет наибольшего значения I_H , которое от напряжения уже не зависит (участок BC на рис. 37.1). Действительно, при отсутствии рекомбинации до пластин доходят все подвижные носители зарядов, которые успевают создавать ионизатор. Поэтому увеличение напряжения больше уже не может усиливать ток. Для увеличения силы тока в этом случае нужно увеличивать интенсивность ионизатора. Такой ток в газе, значение которого не зависит от напряжения, называют **током насыщения**.

Ионы газа, разряжающиеся на обкладках, снова превращаются в нейтральные молекулы того газа, из которого они образовались. Это означает, что химического действия ток в газе не создает и законы Фарадея к нему не применимы.

При достаточно высоком напряжении, когда напряженность поля между пластинами достигает десятков тысяч вольт на сантиметр, свободные электроны, двигаясь под действием сил поля, приобретают столь большую кинетическую энергию, что при столкновениях с молекулами газа отрывают от них электроны, т. е. ионизируют молекулы. Такое явление называется **ударной ионизацией**. В результате ударной ионизации количество носителей тока в газовом промежутке между электродами увеличивается, и ток быстро возрастает (участок CD на рис. 37.1).

Электрический разряд в газе при атмосферном давлении. Разряд в газе, который происходит только под действием постороннего ионизатора, называют **несамостоятельным**. Этот разряд еще называют **тихим** (он обнаруживается только с помощью измерительных приборов). Разряд в газе, который может происходить без воздействия постороннего ионизатора, называют **самостоятельным**.

Итак, носителями тока в газе являются свободные электроны и ионы. Между тем при прохождении тока через газ ионы разряжаются у электродов, превращаясь в нейтральные молекулы и атомы, а электроны поглощаются положительным электродом. Кроме того, еще часть носителей тока исчезает при рекомбинации. Следовательно, для поддержания тока в газе необходимо каким-то образом восполнять непрерывную убыль носителей тока. При самостоятельном разряде, как мы уже знаем, это делает сторонний ионизатор. При самостоятельном разряде эту роль выполняет сам ток.

Существует несколько механизмов образования новых носителей тока в газе. Один из них — **ударная ионизация**. Рассмотрим более подробно, в каком случае она возникает.

При высокой температуре отрицательного электрода происходит **термоэлектронная эмиссия**, создающая значительное число свободных электронов в газе. Далее положительно заряженные ионы газа притягиваются к отрицательному электроду, и если их кинетическая

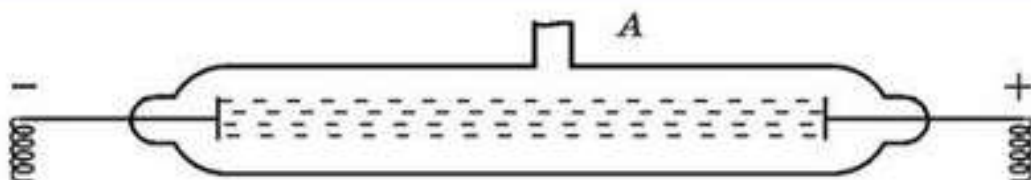


Рис. 37.2

энергия достаточно велика, то при ударе об электрод они могут выбивать из него электроны. Это явление называют *вторичной электронной эмиссией* (рис. 37.2).

При холодном катоде и нормальном давлении вторичная эмиссия в газе возникает только при высоком напряжении. Если же катод накалил, то самостоятельный разряд будет происходить и при небольшом напряжении на электродах. Примером такого разряда является *электрическая дуга*, открытая в 1802 г. русским физиком В. В. Петровым (1761—1834).

Дуговой разряд в газе происходит при раскаленном катоде или при высоком напряжении между электродами. Электрическая дуга широко используется в технике: в дуговых электропечах, при электролизе для получения алюминия, для электросварки, в качестве мощного источника света в прожекторах и т. д. Закон Ома к дуговому разряду не применим.

Искровым называют разряд газа, происходящий при высоком напряжении, достаточном для образования лавинного пробоя. Большая сила тока в момент образования искры снижает напряжение на электродах, и разряд прекращается. Через некоторое время напряжение на электродах поднимается, и разряд вновь возобновляется. Эти разряды следуют друг за другом очень быстро и для газа сливаются в одну искру, которая имеет вид зигзагообразных светящихся линий, соединяющих электроды. При большой мощности источника тока искровой разряд может перейти в дуговой.

Искра представляет собой тонкий ветвистый шнур сильно ионизированного газа. Благодаря высокой электрической проводимости этого шнура через него проходит очень большой ток. Газ в шнуре разогревается до очень высоких температур и ярко светится. Резкое повышение давления, вызванное разогревом газа, создает звуковой эффект. Примером грандиозного искрового разряда в природе является *молния*. Напряжение между землей и тучей во время грозы достигает нескольких сотен вольт, а сила тока в молнии превышает 100 000 А. Извилистый вид молнии объясняется тем, что разряд проходит через участки воздуха с наименьшим сопротивлением, а они расположены в газе случайным образом.

Коронный разряд происходит в газе, когда ударная ионизация возникает не во всем пространстве, занятом полем, а лишь вблизи электродов или проводов, где напряженность поля наиболее высокая.

Лавины затухают, достигая областей с более низкой напряженностью. Этот разряд протекает при напряжении, несколько меньшем того, которое необходимо для возникновения искры. Он возникает около проводов, находящихся под высоким напряжением. Коронный разряд сопровождается слабым свечением и характерным треском. При этом ионы, находящиеся в воздухе вблизи провода, разряжаются на нем, вызывая утечку энергии, передаваемой по проводам. Поэтому “корона” на проводах высоковольтных передач — явление вредное. Полезное применение коронный разряд находит в *электрофильтрах* для очистки топочных газов, загрязняющих воздух мельчайшими частицами золы, и т. д.

Плазма. Ионизированный газ является проводником, хотя в целом он электрически нейтрален, так как содержит равные количества положительных и отрицательных зарядов, являющихся носителями тока. *Газ, в котором значительная часть атомов или молекул ионизирована, называют плазмой*. По-другому можно сказать: *плазмой называют вещество в таком состоянии, когда оно в целом электрически нейтрально, но содержит равные количества свободных положительных и отрицательных зарядов*. Если в плазме встречаются нейтральные атомы или молекулы, то ее называют *частично ионизированной*. Когда же все молекулы или атомы вещества ионизированы, то плазму называют *полностью ионизированной*.

При температуре 20 000—30 000 К любое вещество представляет собой полностью ионизированную плазму. Это наиболее распространенное состояние вещества в природе. Солнце и другие звезды, в которых сосредоточено почти все вещество Вселенной, представляют собой гигантские сгустки высокотемпературной плазмы. Из частично ионизированной плазмы состоят верхние слои атмосферы — *ионосфера*. Такого рода плазма, но в очень сильно разреженном состоянии, рассеяна и в космическом пространстве. Примером частично ионизированной плазмы является также газ, через который проходит электрический ток.

Вопросы для самоконтроля

1. Как объяснить механизм ионизации газов, производимой следующими ионизаторами газа: а) нагреванием до высокой температуры; б) с помощью рентгеновских лучей; в) с помощью ультрафиолетовых лучей; г) с помощью α -лучей?
2. Какой процесс называют *рекомбинацией*? Почему в газе рекомбинация происходит быстро? (Рассмотрите состояние газа после окончания ионизации.)
3. Что такое *ионизация газа*? Опишите, как она протекает.
4. Почему проводимость газов ионно-электронная?
5. Как выглядит вольт-амперная характеристика тока в газе? Объясните характер этой кривой.
6. Что называют *несамостоятельным разрядом*? Как он происходит?
7. Какой процесс называется *ударной ионизацией*, или *ионизацией электронным ударом*?

8. Какие виды самостоятельного разряда вы знаете?
9. Опишите особенности протекания дугового разряда.
10. В чем особенности протекания коронного разряда?
11. Расскажите об особенностях протекания искрового разряда.
12. Что такое *плазма* ?

Что освоили по этой теме?

Насколько полезна и интересна была для вас полученная информация?	Что еще вы хотели бы узнать по данной теме?	Какие вопросы возникли у вас в ходе изучения темы?
---	---	--

§ 38. Электрический ток в вакууме

Ключевые понятия: термоэлектронная эмиссия, электронное облако, двухэлектродная лампа, трехэлектродная лампа, электронно-лучевая трубка.

На этом уроке вы:

узнаете, как протекает процесс термоэлектронной эмиссии; изучите вольт-амперную характеристику вакуумного диода; рассмотрите принцип действия и применение некоторых вакуумных электронных приборов.

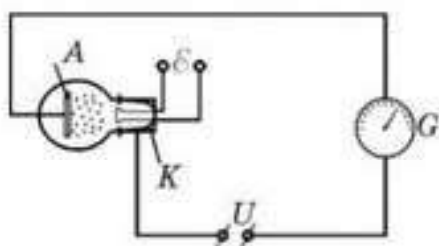


Рис. 38.1

Полный вакуум является идеальным изолятором. Для того чтобы через пространство, в котором создан высокий вакуум, пошел ток, нужно искусственно ввести в данное пространство свободные электроны. Это можно сделать с помощью термоэлектронной эмиссии, помещая в вакуум металлическую проволоку, которую можно включить в электрическую цепь

(рис. 38.1). Когда для опыта берут вакуумную лампу накаливания, то электроны с раскаленной нити вылетают в вакуум. Если между нитью накала *K* и электродом *A* создать электрическое поле, заставляющее электроны двигаться к электроду *A*, то цепь замыкается, и в вакууме течет ток. В этом случае свободные электроны движутся в вакууме беспрепятственно и за счет работы сил поля получают кинетическую энергию.

Если напряжение между электродами (рис. 38.1) равно *U*, то работа сил поля по перемещению электрона между электродами *K* и *A* выражается формулой:

$$A = Ue. \tag{38.1}$$

Поскольку за счет этой работы электроны приобретают кинетическую энергию, получаем:

$$W_k = Ue \text{ или } \frac{mv^2}{2} = eU, \tag{38.2}$$

где *m* — масса; *v* — скорость электрона; *e* — заряд электрона.

Напряжение в этом случае называют *разгоняющим*. Масса электрона очень мала, поэтому движением электронов в вакууме можно легко управлять.

Двухэлектродная лампа (диод). На управлении движением свободных электронов в вакууме с помощью электрического поля основано устройство электронных ламп. *Простейшую электронную лампу с двумя электродами называют двухэлектродной лампой, или диодом*. Одним ее электродом является *вольфрамовая проволока*, концы которой выведены из лампы. Это позволяет накаливать проволоку током от батареи накала B_n (рис. 38.2, а). Внутри лампы создается высокий вакуум. При накаливании проволочки K , которая служит катодом лампы, происходит термоэлектронная эмиссия, и в лампе появляются свободные электроны.

Второй электрод лампы A является анодом. Его можно соединять с катодом K через анодную батарею B_a . Анод имеет один вывод из лампы. Таким образом, диод имеет всего три вывода для включения в цепь. Когда анодная батарея отключена, а катод накален, то свободные электроны, находящиеся внутри лампы, держатся в непосредственной близости от катода и создают отрицательный пространственный заряд, который называют *электронным облаком*. При постоянной температуре накала катода у его поверхности существует подвижное равновесие между электронами, испаряющимися с катода и оседающими на нем. Это означает, что количество свободных электронов в пространстве между катодом и анодом лампы остается постоянным. Чтобы увеличить пространственный заряд между катодом и анодом, необходимо повысить температуру накала нити.

Включим теперь анодную батарею так, чтобы анод лампы был соединен с ее отрицательным полюсом, а катод — с положительным. Тогда электрическое поле внутри лампы будет смещать электроны к катоду, и пространственный заряд в лампе несколько уменьшится, а тока в анодной цепи не будет. Это можно установить с помощью гальванометра.

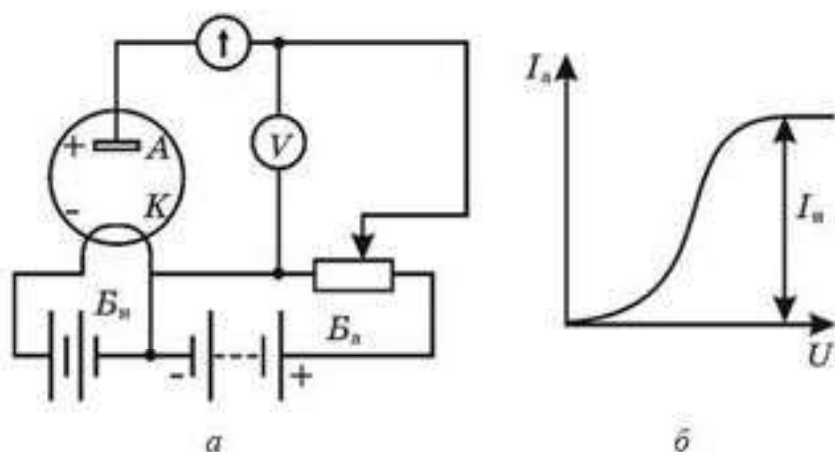


Рис. 38.2

Соединим с анодом лампы положительный полюс батареи B_+ , а с катодом — ее отрицательный полюс B_- (рис. 38.2, а). В этом случае поле в лампе будет перемещать электроны по направлению к аноду, т. е. через лампу пойдет ток, и стрелка гальванометра отклонится.

Таким образом, *диод замечателен тем, что он пропускает ток только в одном направлении*. Этим обусловлено важнейшее применение диода в технике для выпрямления переменного тока. Вначале ток в лампе растет с ростом анодного напряжения, что объясняется рассасыванием электронного облака около катода и уменьшением оседания электронов из облака на катоде. При дальнейшем увеличении напряжения, когда электронное облако полностью рассосется, все вылетевшие из катода электроны будут попадать на анод, и сила тока в лампе перестанет расти, т. е. достигается ток насыщения I_n (рис. 38.2, б). Он будет тем больше, чем выше температура накала катода. Из изложенного выше следует, что закон Ома к электронным лампам не применим.

Трехэлектродная лампа (триод). В электронной лампе удобно управлять током с помощью *дополнительного электрода, который помещают между катодом и анодом и называют сеткой*. Сетку располагают ближе к катоду, и поэтому даже при небольшом напряжении, подаваемом между сеткой и катодом, в зазоре между ними создается мощное электрическое поле, оказывающее сильное влияние на анодный ток лампы. Обычно сетку изготавливают в виде проволочной спирали, навитой с небольшим зазором вокруг катода. Анод делают в форме сплошной цилиндрической поверхности, охватывающей сетку и катод. *Электронную лампу с сеткой называют трехэлектродной лампой, или триодом*. Обозначают триод на схеме так, как указано на рисунке 38.3.

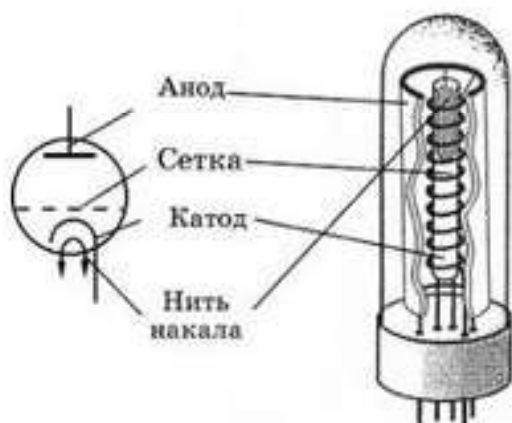


Рис. 38.3

Электронно-лучевая трубка. Для получения изображений на экране с помощью пучка электронов в осциллографах, телевизорах, радиолокационных установках и других электронных приборах используют *электронно-лучевую трубку*. Она представляет собой герметически закрытую стеклянную колбу с широким дном, из которой удален газ. В узкой части трубки расположена *электронная пушка*, которая создает *электронный луч*. Электронная пушка состоит из *подогреваемого катода и управляющего электрода*, который действует подобно сетке в триоде (рис. 38.4).

При подогреве катода происходит термоэлектронная эмиссия. Электроны летят к аноду и по пути проходят через отверстие в управляю-

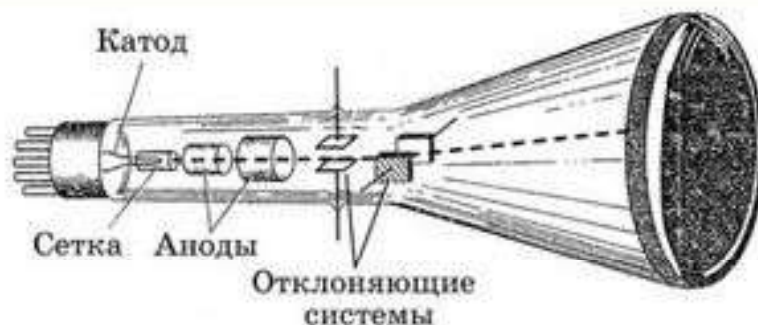


Рис. 38.4

шем электроде, который имеет форму полого цилиндра. Управляющий электрод позволяет регулировать число электронов, прилетающих к аноду, и помогает собирать их в узкий пучок, который и называют *электронным лучом*.

Анод представляет собой несколько дисков с отверстиями, которые помещаются в полый металлический цилиндр. Такое устройство анода помогает фокусировке электронного луча на дне колбы. Дно колбы является *экраном*. Между анодом и катодом трубки создается напряжение в несколько тысяч вольт. Поле между анодом и катодом разгоняет электроны до больших скоростей, поэтому, когда электроны, пролетев колбу, ударяются об экран, покрытый *люминофором*, последний начинает светиться — на экране возникает светлое пятнышко.

Управлять движением электронного луча в трубке можно с помощью дополнительного электрического поля, создаваемого *отклоняющими пластинами*. Для этого в трубку помещают две пары таких пластин, расположенных во взаимно перпендикулярных плоскостях. Поле одной пары пластин отклоняет электронный луч в горизонтальном направлении, поле второй пары — в вертикальном направлении. Таким способом можно перемещать светлое пятнышко в любое место экрана электронно-лучевой трубки. Управлять электронным лучом можно и с помощью магнитных полей. Такое управление лучом используется в трубках телевизоров.

Вопросы для самоконтроля

1. Какой процесс называется *термоэмиссией*? Как он протекает?
2. Как увеличить эмиссию электронов с электрода?
3. Почему проводимость вакуума односторонняя?
4. Что называют *вакуумным диодом*? Как он устроен и как работает?
5. Что называют *вакуумным триодом*? Как он устроен и как работает?
- *6. Что называют *электронно-лучевой трубкой*? Опишите ее устройство и принцип действия.

Пример решения задачи

При электролитическом способе получения алюминия используются ванны, работающие под напряжением 5 В при силе тока 40 кА. Сколько требуется времени для получения 1 г алюминия и каков при этом расход энергии?

Решение. По закону Фарадея:

$$t = \frac{m}{kl}.$$

Расход энергии при мощности $P = IU$ равен:

$$E = Pt = IUt.$$

Вычисления: $t = \frac{10^{-3} \text{ кг}}{0,093 \cdot 10^{-6} \text{ кг/Кл} \cdot 40 \cdot 10^3 \text{ А}} = 3,1 \text{ сут.}$

$$E = 40 \cdot 10^3 \text{ А} \cdot 5 \text{ В} \cdot 74,4 \text{ ч} = 15 \text{ МВт} \cdot \text{ч.}$$

Ответ: 3,1 сут.; 15 МВт · ч.

Упражнение 15

1. При электролизе раствора серной кислоты за 50 мин выделилось 0,3 г водорода. Найдите мощность, расходуемую на нагревание электролита, если его сопротивление равно 0,4 Ом.
2. Аэростат объемом 250 м³ заполняют водородом при температуре 27°C и давлении 0,2 МПа. Какой заряд надо пропустить при электролизе через слабый раствор серной кислоты, чтобы получить нужное количество водорода?
3. В кинескопе телевизора расстояние от анода до экрана составляет 24 см. Электроны проходят это расстояние за 4 нс. Определите ускоряющее анодное напряжение.

Что освоили по этой теме?

Насколько полезна и интересна была для вас полученная информация?	Что еще вы хотели бы узнать по данной теме?	Какие вопросы возникли у вас в ходе изучения темы?

Глава 13. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

§39. Магнитное поле. Правило буравчика.
Вектор магнитной индукции

Ключевые понятия: магнитное поле, силовые линии магнитного поля, вектор магнитной индукции, правило обхвата правой рукой.

На этом уроке вы: узнаете физический смысл вектора магнитной индукции.

После того, как Эрстед обнаружил, что электрический ток действует на стрелку компаса, ориентируя ее так, что она устанавливается перпендикулярно току (рис. 39.1), им была высказана гипотеза о том, что проводник с током изменяет свойства окружающего его пространства. Это измененное пространство становится посредником передачи действия тока на магнитную стрелку. По сути дела, вокруг проводника с током возникает особая среда, передающая магнитные взаимодействия. Эту среду Эрстед назвал *магнитным полем*.

Опыты А. М. Ампера, в которых было обнаружено взаимодействие параллельных токов, показали, что это взаимодействие осуществляется посредством магнитного поля. Параллельные проводники, в которых токи протекают в одном направлении, притягиваются, а если токи текут в противоположных направлениях, то проводники отталкиваются друг от друга, причем сила взаимодействия токов зависит от расстояния между ними (рис. 39.2).

Затем было установлено, что, если поместить между полюсами магнита рамку, по которой течет ток, то она тоже устанавливается строго определенным образом (рис. 39.3). То есть, магнитное поле не только передает магнитные взаимодействия, но и оказывает ориентирующее действие.

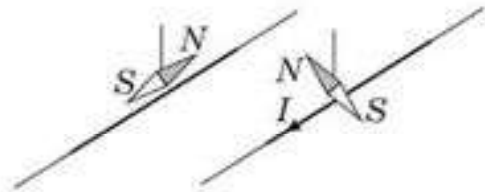


Рис. 39.1

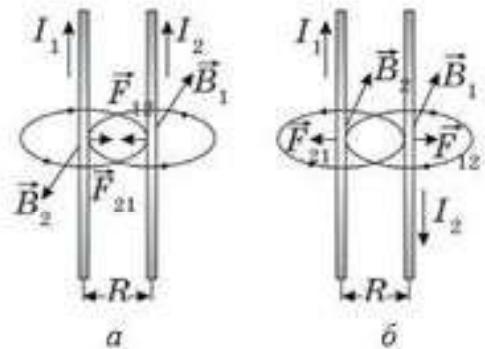


Рис. 39.2. Магнитное взаимодействие токов, идущих в одном (а) и противоположных (б) направлениях



Рис. 39.3



Рис. 39.4. Силовые линии напряженности электрического поля разноименно (а, б) и одноименно (в) заряженных точечных зарядов

По современным представлениям, проводники с током оказывают силовое действие друг на друга не непосредственно, а через окружающие их магнитные поля. Источниками магнитного поля являются *движущиеся электрические заряды* (токи). Магнитное поле возникает в пространстве, окружающем проводники с током, подобно тому, как в пространстве, окружающем неподвижные электрические заряды, возникает электрическое поле. Магнитное поле постоянных магнитов также создается микротоками, циркулирующими внутри молекул вещества.

Магнитное поле токов принципиально отличается от электрического поля. Магнитное поле, в отличие от электрического поля, оказывает силовое действие только на движущиеся заряды (токи).

Магнитное поле — это особый вид материи, передающий магнитные взаимодействия. Оно существует независимо от нас и нашего сознания. Оно непрерывно в пространстве и его действие распространяется практически до бесконечности.

Магнитное поле принято характеризовать другой силовой величиной — *вектором магнитной индукции \vec{B}* .

Магнитное поле изображают графически с помощью силовых линий, вдоль которых располагаются мелкие железные опилки. Эти опилки в магнитном поле намагничиваются и подобны маленьким магнитным стрелкам (рис. 39.4, а, б, в).

Под силовыми линиями магнитного поля понимают воображаемые линии, касательные к которым в каждой точке поля совпадают с направлением вектора магнитной индукции в данной точке.

Силовые линии магнитного поля всегда замкнуты, они нигде не обрываются. Это означает, что магнитное поле не имеет источников — магнитных зарядов. Силовые поля, обладающие этим свойством, называются *вихревыми*.

За *положительное направление вектора* (рис. 39.5) принимается направление от южного полюса S к северному полюсу N магнитной стрелки, свободно ориентирующейся в магнитном поле \vec{B} .

Направление магнитного поля можно найти по правилу обхвата правой рукой: если большой палец правой руки направить по направлению тока в проводнике, то направление четырех пальцев, обхвативших проводник, покажут направление силовых линий магнитного поля.

На рисунке 39.5 изображены силовые линии магнитного поля постоянного магнита и катушки с током. Из рисунка видно, что внутри катушки и внутри постоянного магнита силовые линии магнитного поля идут от южного к северному полюсу, а снаружи, наоборот, от северного к южному. Нам кажется, что силовые линии магнитного поля как бы “выходят” из северного полюса и “входят” в южный полюс.

Правило буравчика. Направление вектора магнитной индукции поля, созданного проводником с током, определяется *правилом буравчика*: если движение острия буравчика с правой резьбой совпадает с направлением тока в проводнике, то направление вектора магнитной индукции совпадает с направлением вращения рукоятки буравчика (рис. 39.6).

В свое время А. Ампер высказал гипотезу о том, что магнитное поле Земли и полосового магнита вызвано микротоками, циркулирующими внутри Земли и магнита. Эта гипотеза получила подтверждение после открытия строения атомного ядра. В роли микротоков выступили электроны,двигающиеся по окружности вокруг своих ядер.

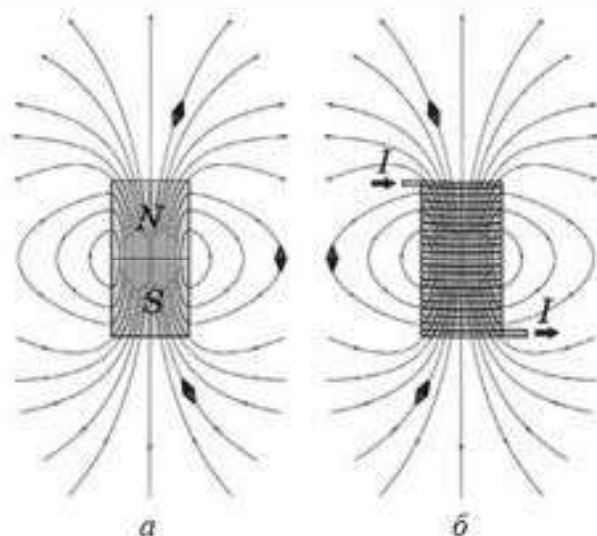


Рис. 39.5. Линии магнитной индукции полей:

a — постоянный магнит, *b* — катушка с током (Индикаторные магнитные стрелки ориентируются в направлении касательных к линиям индукции)

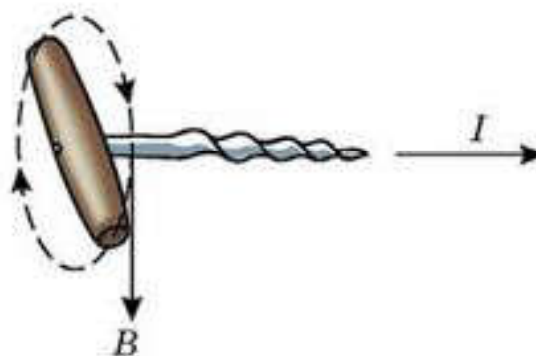


Рис. 39.6

Вопросы для самоконтроля

1. Кто и как доказал связь электрических и магнитных явлений?
2. Расскажите об опыте Эрстеда. Какой вывод можно сделать из этого опыта?
3. Как ведет себя рамка, по которой течет ток в магнитном поле?
4. Что вы понимаете под магнитным полем?
5. Назовите основные свойства магнитного поля.
6. Как изображают магнитное поле на рисунках?

7. Какие линии называются *силовыми линиями магнитного поля*?
8. В чем состоит отличие силовых линий постоянного магнитного поля от силовых линий электростатического поля?
9. Как находят направление силовых линий магнитного поля?
- *10. Как Ампер объяснял магнетизм Земли?

Что освоили по этой теме?

Насколько полезна и интересна была для вас полученная информация?	Что еще вы хотели бы узнать по данной теме?	Какие вопросы возникли у вас в ходе изучения темы?

§ 40. Сила Ампера

Ключевые понятия: сила Ампера, правило левой руки.

На этом уроке вы:

научитесь определять силу действия магнитного поля на проводник с током.

Для того чтобы количественно описать магнитное поле, нужно указать способ определения не только направления \vec{B} , но и его модуля. Проще всего это сделать, внося в исследуемое магнитное поле проводник с током и измеряя силу, действующую на отдельный прямолинейный участок этого проводника.

В 1820 г. французский физик А. Ампер экспериментально показал, что сила, с которой магнитное поле действует на проводник с током, зависит прямо пропорционально от силы тока в проводнике, от длины его активной части (т. е. от длины той части, которая находится в магнитном поле), от величины магнитного поля. Для этого он помещал проводник с током между полюсами подковообразного магнита (рис. 40.1) и менял силу тока, магнитное поле и длину активной части проводника. Кроме этого, Ампер установил, что величина силы, с которой магнитное поле действует на проводник с током, зависит от расположения проводника в магнитном поле. Если проводник с током перпендикулярен линиям индукции магнитного поля, то величина силы максимальна, если проводник с током параллелен силовым линиям магнитного поля, то сила равна нулю. Обобщив результаты своих опытов, Ампер получил формулу для вычисления силы, с которой магнитное

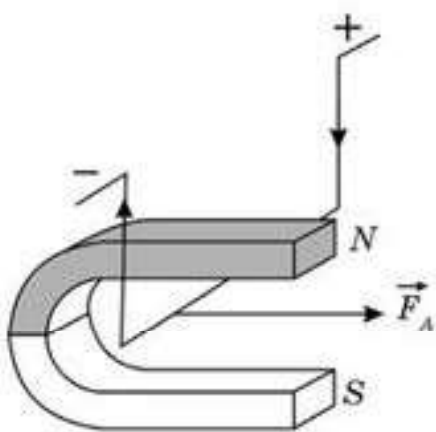


Рис. 40.1

поле действует на проводник с током. Ее назвали *силой Ампера* и находится она по формуле:

$$F_A = BI \Delta l / \sin \alpha,$$

где B — вектор магнитной индукции, I — сила тока в проводнике, Δl — длина активной части проводника, α — угол между вектором магнитной индукции и силой тока в проводнике.

Направление силы Ампера находят по *правилу левой руки*: если левую руку расположить так, чтобы силовые линии магнитного поля входили в ладонь, а четыре пальца руки направить по току, то отставленный под углом 90° большой палец покажет направление силы Ампера (рис. 40.2).

Когда проводник с током перпендикулярен линиям индукции магнитного поля, то сила максимальна и равна

$$F_{\max} = BI \Delta l. \quad (40.1)$$

Отсюда следует, что под *вектором магнитной индукции* следует понимать физическую величину, определяемую максимальной силой, с которой магнитное поле действует на проводник единичной длины, по которому течет единичный ток:

$$B = \frac{F_{\max}}{I \Delta l}. \quad (40.2)$$

В международной системе единиц СИ индукция магнитного поля измеряется в теслах (Тл):

$$[B] = [\text{Тл}] = \left[\frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}} \right].$$

Эта единица названа в честь сербского физика Н. Тесла (1856—1943).

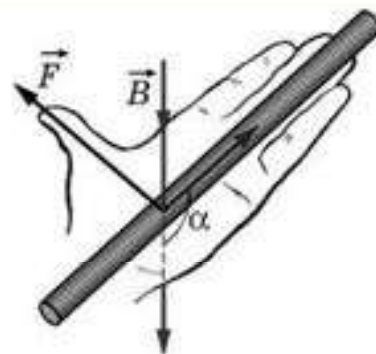


Рис. 40.2

Вопросы для самоконтроля

1. Какая сила называется *силой Ампера*?
2. Как находят направление силы Ампера?
3. Каков физический смысл вектора магнитной индукции?
4. Что понимают под 1 Тл?
5. Сформулируйте правило левой руки.
6. Используя правило “обхвата правой рукой” и правило “левой руки”, докажете, что параллельные токи притягиваются, если они текут в одном направлении, и отталкиваются, если текут в противоположных направлениях.

Что освоили по этой теме?

Насколько полезна и интересна была для вас полученная информация?

Что еще вы хотели бы узнать по данной теме?

Какие вопросы возникли у вас в ходе изучения темы?

§ 41. Сила Лоренца

Ключевые понятия: сила Лоренца, правило левой руки, движение частицы в электрическом и магнитном полях.

На этом уроке вы:

исследуете действие магнитного поля на движущиеся частицы.

Сила, действующая со стороны магнитного поля на движущуюся заряженную частицу, называется **силой Лоренца**. Она получила это название в честь голландского физика Х. Лоренца (1853—1928), создавшего основу электронной теории строения вещества. Эту силу находят с помощью закона Ампера.

Сила Ампера — это сила, действующая на находящийся в магнитном поле отрезок проводника длиной Δl , по которому течет ток силой I . Силу тока можно выразить через среднюю скорость упорядоченного движения носителей заряда и их концентрацию

$$I = \frac{q}{t} = \frac{q_0 N}{t} = \frac{q_0 n V}{t} = \frac{q_0 n S l}{t} = q_0 n S v. \quad (41.1)$$

Тогда сила Ампера может быть выражена через силы, действующие на отдельные носители заряда

$$F_A = B q_0 n v S \Delta l \sin \alpha. \quad (41.2)$$

Учтя тот факт, что общее число носителей заряда, прошедших через поперечное сечение S проводника длиной Δl равно $N = n S \Delta l$, получим, что сила Ампера равна

$$F_A = B q_0 N v \sin \alpha. \quad (41.3)$$

Отсюда следует, что сила, действующая со стороны магнитного поля на отдельную движущуюся в нем заряженную частицу, может быть вычислена по формуле:

$$F_L = B q_0 v \sin \alpha. \quad (41.4)$$

Угол α — это угол между вектором скорости частицы и вектором магнитной индукции.

Эта сила впервые была рассчитана Лоренцем. Направление силы Лоренца находят по **правилу левой руки**: если левую руку расположить

так, чтобы силовые линии магнитного поля входили в ладонь, а четыре пальца руки направить по движению положительно заряженной частицы, то отставленный под углом 90° большой палец покажет направление силы Лоренца.

Движение заряженной частицы в электрическом и магнитном полях.

Частица в электрическом поле. На заряженную частицу в электростатическом поле действует кулоновская сила, которую можно найти, зная напряженность поля в данной точке: $F = Eq$. Эта сила сообщает ускорение:

$$a = \frac{F}{m} = \frac{qE}{m}, \quad (41.5)$$

где m и q — масса и заряд частицы. Направление ускорения будет совпадать с направлением вектора напряженности электрического поля, если заряд частицы положителен ($q > 0$), и будет противоположно ему, если заряд отрицателен ($q < 0$).

Если электростатическое поле **однородное**, то частица будет совершать равноускоренное движение (разумеется, при отсутствии других сил). Вид траектории частицы зависит от начальных условий. Если вначале заряженная частица покоилась ($v_0 = 0$) или ее начальная скорость сонаправлена с ускорением, то частица будет совершать равноускоренное прямолинейное движение вдоль поля и ее скорость будет возрастать. Если векторы начальной скорости и ускорения антипараллельны, то частица будет тормозиться в этом поле.

Если угол между начальной скоростью и ускорением острый $0 < \alpha < 90^\circ$ (или тупой), то заряженная частица в таком электростатическом поле будет двигаться по параболе.

Во всех случаях при движении заряженной частицы в электростатическом поле будет изменяться модуль скорости, а, следовательно, и кинетическая энергия частицы.

Частица в магнитном поле. Необходимо помнить, что магнитное поле *не действует на покоящуюся заряженную частицу*. Магнитное поле действует только на движущиеся в поле заряженные частицы. Кроме этого, сила Лоренца, действующая на заряженные частицы в магнитном поле, всегда перпендикулярна скорости их движения. Поэтому модуль скорости в магнитном поле не изменяется. Не изменяется, следовательно, и кинетическая энергия частицы. Вид траектории заряженной частицы в магнитном поле зависит от угла между скоростью влетающей в поле частицы и магнитной индукцией. Возможны три различных случая.

1. Заряженная частица влетает параллельно силовым линиям магнитного поля. В этом случае сила Лоренца на частицу не действует, и частица будет продолжать двигаться **равномерно прямолинейно**.

2. Частица влетает перпендикулярно силовым линиям магнитного поля (рис. 41.1). В этом случае сила Лоренца направлена перпендикулярно скорости частицы и магнитному полю и будет сообщать ей центростремительное ускорение:

$$a_n = \frac{F_n}{m} = \frac{Bqv}{m} \quad (41.6)$$

В то же время центростремительное ускорение равно:

$$a_n = \frac{v^2}{R} \quad (41.7)$$

Следовательно, заряженная частица, влетевшая перпендикулярно магнитному полю, будет двигаться в нем по окружности радиусом:

$$R = \frac{mv}{Bq} \quad (41.8)$$

Так как модуль скорости частицы не меняется, то можно рассчитать период обращения частицы $T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi m}{Bq}$.

Из последней формулы видно, что период обращения частицы не зависит от ее скорости и радиуса траектории, а зависит только от удельного заряда частицы ($\frac{q}{m}$) и магнитной индукции поля, в которое она попала.

3. Частица влетает под углом к силовым линиям магнитного поля (рис. 41.2). Движение частицы можно представить как суммы двух движений: равномерного прямолинейного движения вдоль поля со скоростью $v_{||} = v \cos \alpha$ и движения по окружности с постоянной по модулю скоростью $v_{\perp} = v \sin \alpha$ в плоскости, перпендикулярной полю. В результате частица будет двигаться по винтовой линии, ось которой параллельна магнитному полю. Радиус окружности этой линии постоянен и равен:

$$R = \frac{mv \sin \alpha}{Bq} \quad (41.9)$$

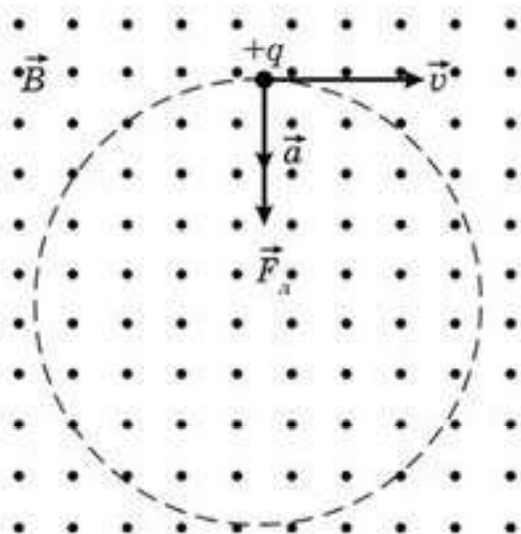


Рис. 41.1

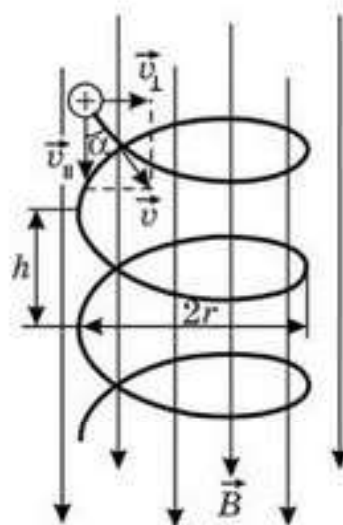


Рис. 41.2

а шаг винта (тоже неизменный) находят по формуле:

$$h = Tv \cos \alpha = \frac{2\pi m}{Bq} v \cos \alpha, \quad (41.10)$$

Направление, в котором закручивается спираль, зависит от знака заряда частицы.

4. Если скорость заряженной частицы составляет угол с направлением вектора индукции **неоднородного** магнитного поля, причем индукция поля возрастает в направлении движения частицы, то радиус окружности и шаг винта уменьшаются с ростом B . На этом основана фокусировка заряженных частиц в магнитном поле.

5. Если на движущуюся заряженную частицу помимо магнитного поля с индукцией B действует одновременно и электростатическое поле с напряженностью E , то равнодействующая сила, приложенная к частице, равна векторной сумме электрической силы и силы Лоренца: $\vec{F} = \vec{F}_e + \vec{F}_m$. Характер движения и вид траектории зависят в данном случае от соотношения этих сил и от направления электростатического и магнитного полей. Так, например, если векторы скорости заряженной частицы, напряженности электрического поля и индукции магнитного поля взаимно перпендикулярны, то можно добиться равномерного движения частицы в этих полях, а скорость частицы будет определяться соотношением $v = \frac{E}{B}$.

Вопросы для самоконтроля

1. Как будет двигаться заряженная частица, влетев в электрическое поле: а) параллельно его силовым линиям; б) перпендикулярно его силовым линиям; в) под углом к его силовым линиям?
2. Как будет двигаться в магнитном поле первоначально покоящаяся заряженная частица?
3. Какая сила заставляет двигаться заряженную частицу, попавшую в магнитное поле, по окружности? Как рассчитать радиус этой окружности?
- *4. Заряженная частица влетела в неоднородное магнитное поле, индукция которого уменьшается в направлении движения частицы. Как будут изменяться период обращения, радиус окружности и шаг винтовой линии частицы?

Что освоили по этой теме?

Насколько полезна и интересна была для вас полученная информация?	Что еще вы хотели бы узнать по данной теме?	Какие вопросы возникли у вас в ходе изучения темы?

§ 42. Магнитные свойства вещества

Ключевые понятия: магнитная проницаемость, диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики.

На этом уроке вы:

научитесь классифицировать вещества по их магнитным свойствам и определять сферы их применения; анализировать современные области применения магнитных материалов и обсуждать тенденции их применения.

Магнит — тело, обладающее собственным магнитным полем. Слово “магнит” происходит от древнегреческого *magnetis lithos* — камень из Магнессии (название древнего города Магнессия в Малой Азии). В древности в этих местах были открыты залежи магнетита — камня, который обладал магнитным полем. Магнетит также известен, как магнитная руда или магнитный железняк.

В настоящее время мы знаем, что магнетит (или магнитный железняк) представляет собой минерал, состоящий из FeO (31%) и Fe₂O₃ (69%).

В веществе магнитное поле создается не только теми токами, которые текут по проводам, но и теми движениями электронов, которые происходят внутри атомов и молекул самого вещества. Эти движения эквивалентны некоторым микроскопическим токам, которые принято называть молекулярными токами. Представление о молекулярных токах было введено А. Ампером, впервые высказавшим гипотезу о том, что магнитные свойства любого намагниченного тела обусловлены множеством элементарных круговых токов, циркулирующих внутри тела.

В отсутствие внешнего магнитного поля молекулярные токи в веществе ориентированы беспорядочно, и их собственные магнитные поля оказываются компенсированными. При наложении внешнего магнитного поля B_0 эта компенсация нарушается, и появившееся поле молекулярных токов изменяет индукцию магнитного поля в веществе. Тело при этом, как принято говорить, *намагничивается*. Индукция B магнитного поля в намагниченном веществе может оказаться как больше, так и меньше, чем B_0 .

Физическая величина, равная отношению индукции магнитного поля в однородной среде (B) к индукции магнитного поля в вакууме (B_0), называется магнитной проницаемостью среды:

$$\mu = \frac{B}{B_0}.$$

У большинства веществ магнитная проницаемость μ (мю) мало отличается от единицы. При внесении в магнитное поле такие тела намагничиваются очень слабо ($B \approx B_0$), и потому их называют

слабодиамагнитными. Например, у воздуха $\mu = 1,000\ 000\ 38$, у платины $\mu = 1,000\ 25$, у алюминия $\mu = 1,000\ 023$, у цинка $\mu = 0,999\ 991$, у стекла $\mu = 0,999\ 987$, у золота $\mu = 0,999\ 961$. Вещества, у которых $\mu > 1$, намагничиваются в направлении внешнего магнитного поля, а вещества, у которых $\mu < 1$, намагничиваются навстречу приложенному магнитному полю. Первые из этих веществ Фарадей назвал *парамагнетиками*, вторые — *диамагнетиками*. До Фарадея магнитные свойства этих веществ (из-за их слабости) практически не были известны.

Сильными магнитными свойствами обладают вещества, называемые *ферромагнетиками*; у них $\mu > 1$. Это железо, никель, кобальт, множество их сплавов, а также редкоземельные элементы.

При помещении ферромагнетиков во внешнее магнитное поле B_0 они намагничиваются и начинают создавать свое собственное магнитное поле, которое может в сотни и тысячи раз превышать B_0 . Магнитная проницаемость ферромагнетиков зависит от индукции внешнего (намагничивающего) поля (рис. 42.1).

Приводимые личные значения μ для них обычно соответствуют наибольшим значениям этой величины. Например, у кобальта $\mu = 175$, у никеля $\mu = 1120$, у трансформаторной стали $\mu = 8000$, у пермаллоя $\mu = 68$ (особого железоникелевого сплава) $\mu = 250\ 000$, а у супермаллоя магнитная проницаемость достигает 10^6 .

При выключении внешнего магнитного поля ферромагнетик остается намагниченным, т.е. продолжает создавать свое собственное магнитное поле. Однако остаточная намагниченность у разных веществ оказывается разной. Ферромагнетики, у которых остаточная намагниченность велика, называют *жесткими* (или *магнитно-жесткими*). Именно их используют для изготовления *постоянных магнитов*. К жестким ферромагнетикам относятся углеродистая сталь и некоторые специальные сплавы.

Ферромагнетики, у которых после выключения внешнего магнитного поля остается небольшая намагниченность, называют *мягкими* (или *магнитно-мягкими*). К ним относятся чистое железо, электротехническая сталь, пермаллой. Мягкие ферромагнетики применяют там, где происходит их частое перемагничивание (трансформаторы, электродвигатели и т.д.).

Для каждого ферромагнетика существует определенная температура, выше которой его ферромагнитные свойства исчезают и вещество становится парамагнетиком. Эту

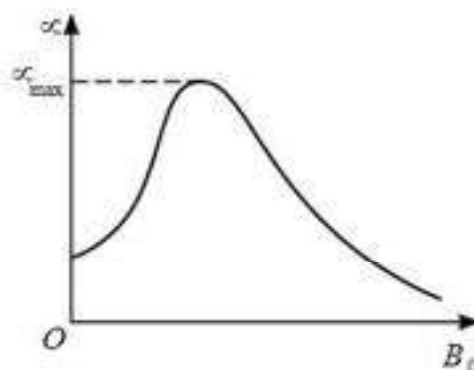


Рис. 42.1

температуру называют **температурой** (или точкой) **Кюри** (t_c) по имени открывшего это явление французского ученого Пьера Кюри. Например, у железа $t_c = 768^\circ\text{C}$.

Первые исследования свойств ферромагнетиков были выполнены русским физиком А. Г. Столетовым в 1871—1872 гг. В настоящее время современная техника уже немыслима без применения ферромагнитных материалов. Ферромагнетики используются в качестве постоянных магнитов в электроизмерительных приборах, громкоговорителях, магнитных компасах, в качестве сердечников, применяемых в электромагнитах, трансформаторах и электродвигателях. Ферромагнитным материалом покрыты магнитные ленты, используемые в магнитофонах, видеомагнитофонах и ЭВМ.

Большое применение получили *ферриты* — материалы, представляющие собой химические соединения оксида железа Fe_2O_3 с оксидами некоторых других металлов. Ферриты сочетают в себе ферромагнитные свойства со свойствами полупроводников или диэлектриков, что позволяет применять их в радиотехнике, электронике и вычислительной технике (ферритовые антенны, ферритовые сердечники, элементы оперативной памяти в вычислительной технике, небольшие постоянные магниты и т. д.). К ферритам относится и магнетит.

Вопросы для самоконтроля

1. Каково происхождение названия *магнит* ?
2. В чем заключается гипотеза Ампера?
3. Что такое *магнитная проницаемость* ?
4. Какие вещества называют *пара-* и *диамагнетиками* ? Приведите примеры.
5. Что такое *ферромагнетики* ? Приведите примеры.
6. Перечислите основные свойства ферромагнетиков.
7. Будет ли железная деталь, нагретая до температуры 800°C , притягиваться к магниту?
8. Что такое *ферриты* ? Где они применяются?

Что освоили по этой теме?

Насколько полезна и интересна была для вас полученная информация?	Что еще вы хотели бы узнать по данной теме?	Какие вопросы возникли у вас в ходе изучения темы?

§ 43. Искусственные магниты. Соленоид

Ключевые понятия: магнит, природные магниты, электромагниты, временные или искусственные магниты, соленоид.

На этом уроке вы:

познакомитесь с электромагнитом, полезными свойствами электромагнитов, соленоидом и их применениями.

Существуют три вида магнитов:

— *природные магниты* (естественные), называемые магнитной рудой, образуются, когда руда, содержащая железо или оксид железа, охлаждается и намагничивается за счёт земного магнетизма. Постоянные магниты обладают магнитным полем при отсутствии электрического тока, так как их домены ориентированы в одном направлении и их магнитные поля, складываясь, усиливают друг друга.

— *электромагниты* (искусственные) представляют собой металлический сердечник с проволочной катушкой, по которой проходит электрический ток. Вследствие этого образуется магнитное поле и магнит взаимодействует с металлическими предметами.

— *временные магниты* (искусственные) — это магниты, которые действуют как постоянные магниты только тогда, когда находятся в намагниченном состоянии. Со временем они теряют магнитные свойства (размагничиваются).

Электромагнит — катушка из изолированной проволоки с железным сердечником внутри, создающая при прохождении по ней тока магнитное поле. Сердечник служит для усиления магнитного поля, т. к. железо значительно лучше проводит магнитные силовые линии, чем воздух (число магнитных линий, проходящих через железо, в сотни раз больше числа этих линий, проходящих через то же поперечное сечение в воздухе).

На том конце электромагнита, с которого ток представляется идущим против часовой стрелки, образуется северный полюс N , на противоположном — южный S .

Для усиления действия электромагниту часто придают подковообразную форму; в этом случае электромагнит притягивает одновременно двумя полюсами (N и S) (рис. 43.1).

Применение электромагнитов.

Электромагниты получили настолько широкое распространение, что трудно назвать область техники, где бы они не применялись в том или ином виде. Они содержатся во многих бытовых приборах — электро бритвах, магнитофонах, теле-



Рис. 43.1



Рис. 43.2

визорах и т. п. Устройства техники связи — телефония, телеграфия и радио — немыслимы без их применения.

Электромагниты являются неотъемлемой частью электрических машин, многих устройств промышленной автоматики, аппаратуры регулирования и защиты разнообразных электротехнических установок.

Развивающейся областью применения электромагнитов является медицинская аппаратура. Наконец, гигантские электромагниты для ускорения элементарных частиц применяются в синхротронах.

Вес электромагнитов колеблется от долей грамма до сотен тонн, а потребляемая при их работе электрическая мощность — от милливатт до десятков тысяч киловатт.

Особой областью применения электромагнитов являются электромагнитные механизмы. В них электромагниты используются в качестве привода для осуществления необходимого поступательного перемещения рабочего органа или поворота его в пределах ограниченного угла, или для создания удерживающей силы.

Примером подобных электромагнитов являются тяговые электромагниты, предназначенные для совершения определенной работы при перемещении тех или иных рабочих органов: электромагнитные замки; электромагнитные муфты сцепления и торможения и тормозные электромагниты; электромагниты, приводящие в действие контактные устройства в реле, контакторах, пускателях, автоматических выключателях; подъемные электромагниты, электромагниты вибраторов и т. п.

В ряде устройств наряду с электромагнитами или взамен их используются постоянные магниты (например, магнитные плиты металлорежущих станков, тормозные устройства, магнитные замки и т. п.) (рис. 43.2).

Действие электромагнита зависит как от силы магнитного поля, так и от силы и направления электрического тока в обмотке.

Полезные свойства электромагнитов: быстро размагничиваются при выключении тока, можно изготовить любых размеров, при работе можно регулировать магнитное действие, меняя силу тока в цепи.

Соленоид — это катушка индуктивности в виде намотанного на цилиндрическую поверхность изолированного проводника, по которому течет электрический ток. Электрический ток в обмотке создает

в окружающем пространстве магнитное поле соленоида. Соленоид становится магнитом (рис. 43.3).

Железные опилки притягиваются к концам катушки при прохождении через нее электрического тока и отпадают при отключении тока (рис. 43.4).

Сила магнитного поля катушки с током зависит от числа витков катушки, от силы тока в цепи и от наличия сердечника в катушке. Чем большее число витков в катушке и чем больше сила тока, тем сильнее магнитное поле. Железный сердечник, введенный внутрь катушки с током, усиливает магнитное поле катушки. Если подвесить соленоид на нити, то он повернется и сорентируется в магнитном поле Земли подобно свободно вращающейся магнитной стрелке (рис. 43.5).

Конец соленоида, из которого магнитные линии выходят, становится северным полюсом, а другой конец, в который магнитные линии входят, — южным полюсом магнита-соленоида.

Графически изображение магнитного поля соленоида похоже на магнитное поле полосового магнита.

Магнитные линии магнитного поля катушки с током — замкнутые кривые, направленные снаружи катушки от северного полюса к южному полюсу (рис. 43.6).

Внутри соленоида, длина которого значительно больше диаметра, магнитные линии магнитного поля параллельны и направлены вдоль соленоида. Здесь магнитное поле однородно, его напряженность пропорциональна силе тока и числу витков. Внешнее магнитное поле соленоида неоднородно.

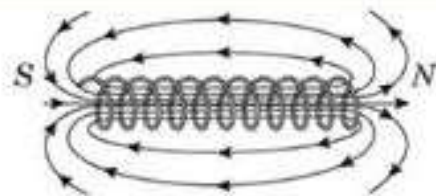


Рис. 43.3



Рис. 43.4

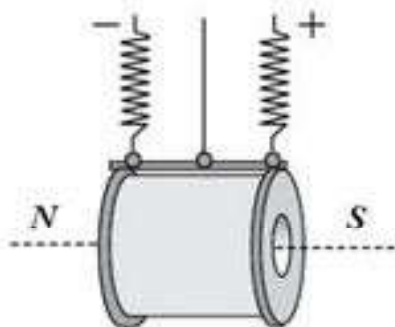


Рис. 43.5

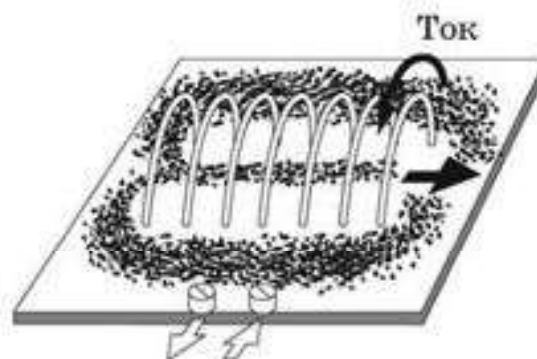


Рис. 43.6

Вопросы для самоконтроля

1. Какие виды магнитов вы знаете?
2. Что такое *электромагнит* ? Где он применяется?
3. Что называют *соленоидом* ? В каких целях он применяется?

Пример решения задачи

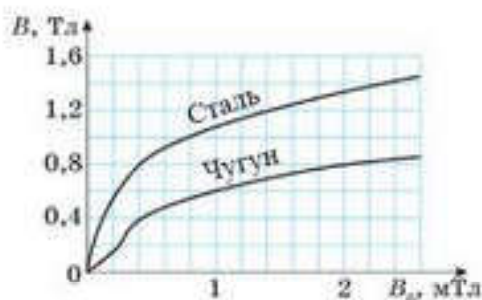


Рис. 43.7

Внутри соленоида без сердечника индукция поля $B_0 = 2$ мТл. Каким станет магнитный поток, если в соленоид ввести чугунный сердечник площадью поперечного сечения 100 см^2 ? Использовать рисунок 43.7?

Решение. Магнитный поток равен:

$$\Phi = BS,$$

где $B = \mu B_0$ находится из графика: $B = 0,8$ Тл.

Вычисления: $\Phi = 0,8 \text{ Тл} \cdot 0,01 \text{ м}^2 = 8 \text{ мВб}$.

Ответ : 8 мВб.

Упражнение 16

1. В магнитном поле с индукцией 0,1 Тл расположен проводник длиной 0,5 м, сила тока в котором 6 А. Вычислите действующую на проводник силу, если направление тока составляет с вектором магнитной индукции углы 90° , 30° и 0° .
2. Определите наибольшее и наименьшее значения силы, действующей на проводник длиной 0,3 м, сила тока в котором 5 А, при различных его положениях в однородном магнитном поле с индукцией 0,2 Тл.
3. Проводник массой 5 г и длиной 0,1 м находится в однородном магнитном поле с индукцией 0,3 Тл и расположен перпендикулярно линиям индукции. Какой силы ток нужно пропустить по нему, чтобы сила Ампера уравновесила силу тяжести?

Что освоили по этой теме?

Насколько полезна и интересна была для вас полученная информация?	Что еще вы хотели бы узнать по данной теме?	Какие вопросы возникли у вас в ходе изучения темы?

Глава 14. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

§ 44. Закон электромагнитной индукции

Ключевые понятия: электромагнитная индукция, индукционный ток, ЭДС индукции, магнитный поток.

На этом уроке вы:

узнаете, кем и как произошло открытие явления электромагнитной индукции; выясните сущность этого явления; ознакомитесь с опытами Фарадея и узнаете, как возникает и от чего зависит ЭДС индукции в контуре.

После открытия Эрстедом действия магнитного поля на магнитную стрелку в научном мире того времени “заработал фермент опытов и открытий”. Ампер, Фарадей и другие ученые провели полное и подробное исследование магнитного взаимодействия электрических токов. Многие физики были убеждены в том, что если движущийся заряд (ток) создает вокруг себя магнитное поле, то должно существовать обратное явление — магнитное поле возбуждает в проводниках электрический ток. Обоснованием такого утверждения служил тот факт, что многие явления в природе симметричны: левое и правое, положительный и отрицательный (заряды), северный и южный (магнитные полюсы) и т. д.

Открытие М. Фарадеем *электромагнитной индукции*, имевшее фундаментальное значение, произошло почти через 12 лет после открытия Эрстеда. Из этих экспериментальных открытий выросла затем *полная классическая теория электромагнетизма*. Максвелл придал ей математическую форму, а Герц блестяще подтвердил ее экспериментально, показав существование электромагнитных волн.

Итак, задача перед физиками того времени стояла предельно простая — выяснить, если ток порождает магнитное поле, то нельзя ли с помощью магнитного поля в контуре возбудить ток, т. е. если I порождает B , то должно существовать обратное явление — B должно порождать ток. Фарадею первому удалось доказать это экспериментально. Историки утверждают: чтобы постоянно помнить о поставленной задаче, ученый в кармане своего жилета носил магнит.

Один из основных опытов Фарадея очень прост. Его можно продемонстрировать в любом классе и даже в домашних условиях. Для этого необходимо иметь постоянный магнит, чувствительный гальванометр, полуцилиндрическую катушку (соленоид) или просто контур, концы которого необходимо подсоединить к гальванометру (рис. 44.1). Если

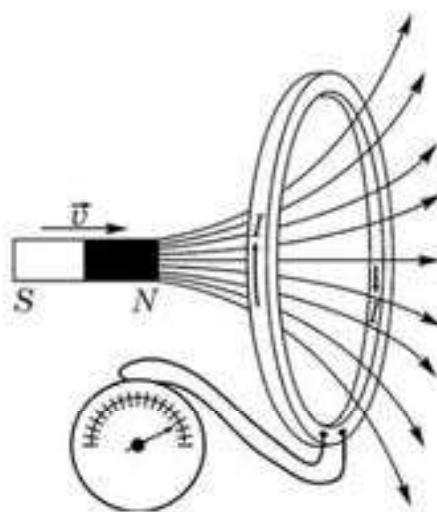


Рис. 44.1

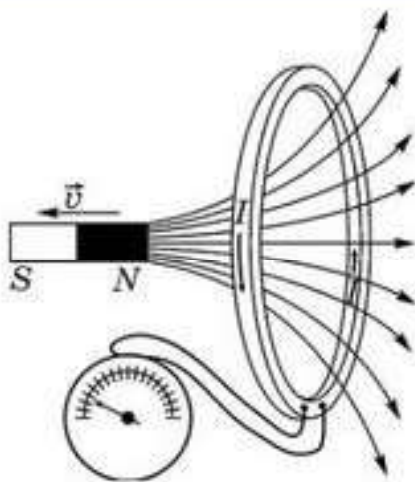
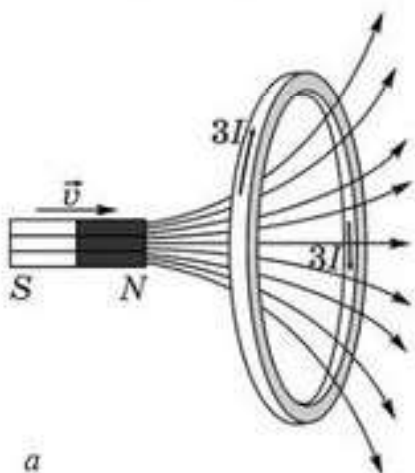
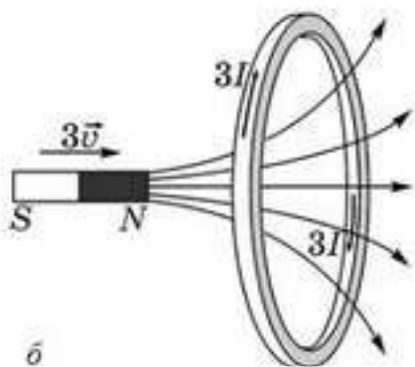


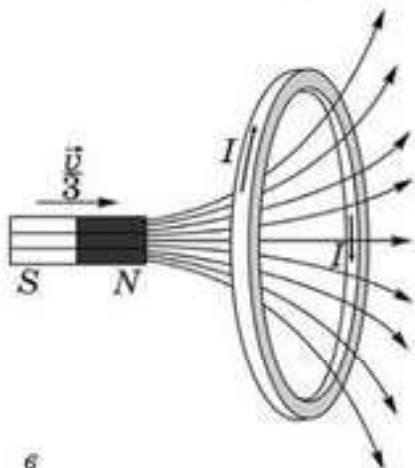
Рис. 44.2



a



б



в

Рис. 44.3

вдвигать (или выдвигать) магнит в контур, то гальванометр будет регистрировать ток. Если магнит покоится относительно контура, то тока в цепи нет.

М. Фарадею первому удалось обнаружить возникновение *индукционного (наведенного) тока*, который возникал только тогда, когда магнит двигался относительно контура. Это произошло в 1831 г. В том же году Фарадеем была установлена *зависимость величины индукционного тока от причин, его вызывающих*. Из многочисленных опытов, проведенных Фарадеем, можно выделить три основных, раскрывающих суть открытого им явления.

1. В момент вдвигания магнита, а затем в момент его выдвигания наблюдается отброс стрелки гальванометра (рис. 44.1, 44.2). Направления отклонений стрелки при этом противоположны. Это говорит о том, что направление индукционного тока меняется на противоположное. Отброс стрелки тем больше, чем больше скорость продвижения магнита (рис. 44.3, а, б, в). В этой же серии экспериментов было обнаружено следующее: если взять несколько одинаковых полосовых магнитов, сложить их вместе и вдвигать с такой же скоростью, что и один, то сила тока увеличится прямо пропорционально числу магнитов. Если их вдвигать очень медленно, то сила тока может быть меньше, чем с одним магнитом при его резком (быстром) вдвигании в контур.

2. Другая серия опытов заключалась в следующем. Если заменить полосовой магнит катушкой с током (рис. 44.4), концы первой катушки подсоединить к гальванометру, а через вторую пропускать ток, то в момент включения или выключения тока, увеличения или уменьшения его с помощью реостата наблюдается отброс стрелки гальванометра. При включении тока, его увеличении или сближении катушек стрелка отклоняется в одну сторону, а при выключении тока, уменьшении его или удалении катушек — в другую.

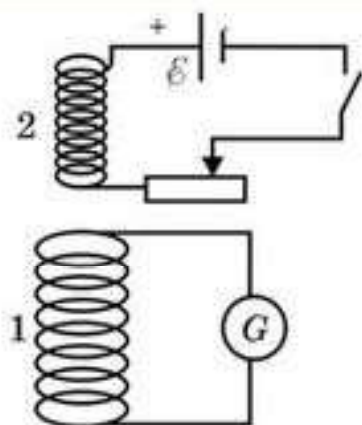


Рис. 44.4

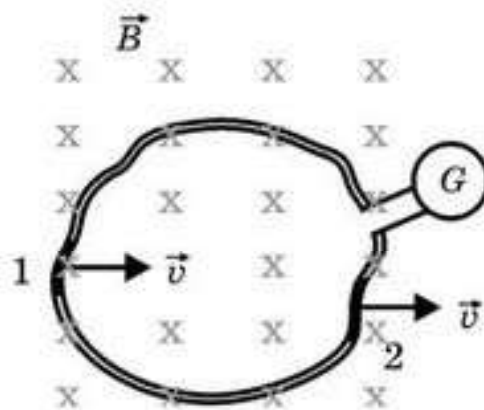


Рис. 44.5

3. Если взять катушку из мягкого провода, чтобы можно было менять форму, растягивая или сжимая ее, изменять площадь, и подсоединить ее к гальванометру, а перед ней поместить магнит, то при сжатии или растяжении катушки, при изменении ее площади гальванометр покажет наличие тока, направление которого также меняется в зависимости от уменьшения или увеличения объема катушки.

В этой же серии опытов можно выделить еще один: если перемещать контур с присоединенным к нему гальванометром в однородном магнитном поле так, чтобы линии индукции магнитного поля все время были перпендикулярны плоскости контура (рис. 44.5), то ток в нем не возникнет. Если же контур вращать в этом поле, то гальванометр покажет ток, направление которого зависит от направления вращения.

Из всех этих опытов следуют **выводы**:

1. ЭДС индукции (и, соответственно, индукционный ток) возникает в контуре тогда и только тогда, когда поток вектора индукции магнитного поля, пронизывающий контур, меняется с течением времени, т. е. $\Delta\Phi \neq 0$.

2. Величина индукционного тока зависит от скорости изменения магнитного потока, пронизывающего контур, т. е. от $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$.

3. Индукционный ток в контуре возникает тогда и только тогда, когда проводник пересекает силовые линии магнитного поля.

Обобщая экспериментальные данные своих опытов, Фарадей пришел к следующему выводу: ЭДС индукции, возникающая в контуре, прямо пропорциональна скорости изменения магнитного потока, пронизывающего контур:

$$|\mathcal{E}_i| = k \left| \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right|. \quad (44.1)$$

Значение коэффициента пропорциональности k зависит от выбора единицы измерения магнитного потока. Если его принять равным единице, ЭДС индукции \mathcal{E}_i измерять в вольтах, время Δt в секундах,

то за единицу магнитного потока надо выбрать такой поток, появление или исчезновение которого в течение одной секунды создает в охватывающем его проводнике ЭДС индукцию, равную одному вольту. В Международной системе единиц (СИ) этот поток соответствует одному веберу (1 Вб).

Вопросы для самоконтроля

1. В чем заключается явление электромагнитной индукции? Кем оно было обнаружено?
2. Приведите примеры, в которых опытным путем можно обнаружить явление электромагнитной индукции.
3. Возникнут ли ЭДС индукции и индукционный ток, если: а) вдвигать магнит в покоящийся замкнутый контур; б) вдвигать замкнутый контур на неподвижный магнит? Что изменится, если контур будет разомкнутым?
4. Возникнут ли ЭДС индукции и индукционный ток, если замкнутый ток двигать параллельно магнитному полю?
- *5. Контур внесен в однородное магнитное поле. В каких случаях в нем будет возникать индукционный ток: а) контур движется перпендикулярно силовым линиям поля; б) контур движется поступательно под некоторым углом к полю; в) контур поворачивается в поле вокруг некоторой оси?

Что освоили по этой теме?

Насколько полезна и интересна была для вас полученная информация?	Что еще вы хотели бы узнать по данной теме?	Какие вопросы возникли у вас в ходе изучения темы?

§ 45. Правило Ленца

Ключевые понятия: магнитный поток, индукционный ток.

На этом уроке вы:

узнаете, от чего зависит величина индукционного тока; научитесь определять направление индукционного тока в контуре.

Как известно, силовые линии магнитного поля замкнуты, и принято, что силовые линии выходят из северного полюса и входят в южный. Даже у тонкого плоского контура имеются северный и южный магнитные полюсы (рис. 45.1). При заданном направлении тока над контуром будет северный полюс, под контуром — южный. Если вернуться к первому опыту М. Фарадея (рис. 44.1, 44.2), при вдвигании магнита в контур северным полюсом слева от контура должен появиться северный полюс — за счет индукционного тока, возникающего в контуре. В противном случае произошло бы нарушение закона сохранения энергии. Если бы слева от контура возник южный полюс, то индукционный ток, возникающий при движении магнита, совершал бы работу, в итоге которой стало бы количество теплоты, рассчитываемое по закону Джоуля — Ленца. И к тому же магнит сам втягивался бы в контур, увеличивая свою кинетическую энергию. Это приводило бы к нарушению закона сохранения энергии. При сравнении рисунков 45.2 и 45.3 видно, что поток вектора индукции магнитного поля, создаваемый индукционным током, направлен в данном случае против нарастающего поля магнита. Если магнит выдвигать из контура, то сверху должен возникнуть южный

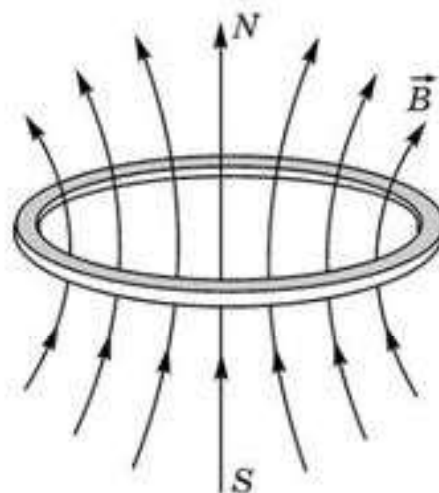


Рис. 45.1

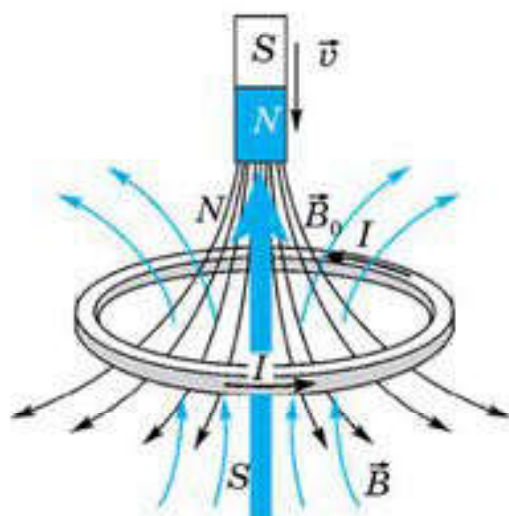


Рис. 45.2

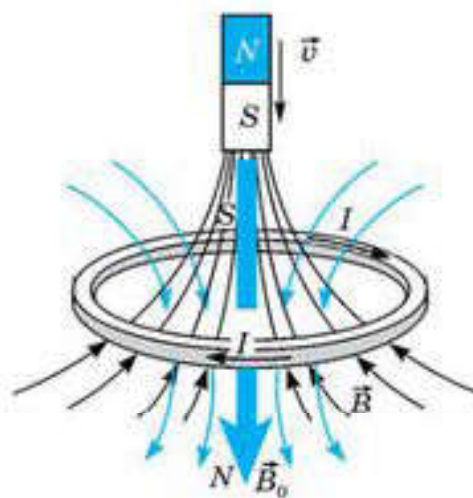


Рис. 45.3

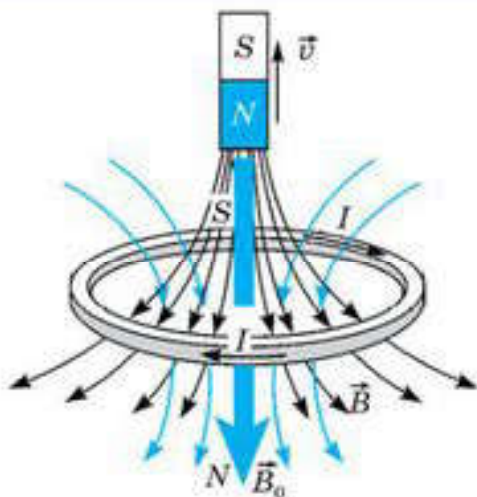


Рис. 45.4

полос (рис. 45.4). Для создания индукционного тока необходима работа сторонних сил, как раз ее мы и будем совершать, преодолевая притяжение между N и S . Следовательно, чтобы не нарушался закон сохранения энергии, направление тока в контуре должно измениться на противоположное, что вызовет изменение направления магнитного поля индукционного тока.

Сопоставим рисунки 45.2 и 45.3. На первом из них поток магнитного поля, пронизывающий контур, увеличился, т. е.

$$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} > 0, \text{ а поток магнитного поля индукци-}$$

онного тока этому увеличению препятствует. На рисунке 45.4 — такая же картина. Выдвигая магнит, мы уменьшаем поток магнитного поля, пронизывающий контур, т. е. $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} < 0$, но и здесь магнитное поле индукционного тока препятствует изменению того магнитного потока, который вызвал индукционный ток.

Итак, $|\mathcal{E}_i| = k \left| \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right|$ вызовет индукционный ток $I_i = \frac{|\mathcal{E}_i|}{R} = \frac{|\Delta\Phi|}{R|\Delta t|}$, где R — сопротивление контура, магнитное поле которого препятствует изменению того внешнего магнитного поля, которое вызвало этот ток.

Это и есть *правило Ленца*, которое определяет направление индукционного тока. Оно звучит так: *индукционный ток I_i , возникающий в замкнутом контуре при изменении внешнего магнитного поля, всегда направлен так, что создаваемое им собственное магнитное поле препятствует изменению внешнего магнитного поля.* Следовательно, $\Delta\Phi_i$ и $\Delta\Phi$ имеют противоположные знаки, т. е. коэффициент пропорциональности в законе электромагнитной индукции $k = -1$, тогда:

$$\mathcal{E}_i = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (45.1)$$

Величина индуцированного тока равна:

$$I_i = - \frac{1}{R} \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (45.2)$$

Вопросы для самоконтроля

1. Объясните причину возникновения индукционного тока в замкнутом контуре при введении в него прямого магнита.
2. Как можно рассчитать величину индукционного тока, возникающего в замкнутом контуре?
3. Как соотносятся между собой потоки внешнего магнитного поля и индукционного тока?
4. Сформулируйте правило Ленца.
- *5. Почему можно провести аналогию между магнитным потоком и импульсом тела?

Что освоили по этой теме?

Насколько полезна и интересна была для вас полученная информация?

Что еще вы хотели бы узнать по данной теме?

Какие вопросы возникли у вас в ходе изучения темы?

§ 46. Электромагнитные приборы

Ключевые понятия: реле, электромагнит, генератор, ЭДС индукции, индуктор, трансформатор, повышающий трансформатор, понижающий трансформатор, коэффициент трансформации.

На этом уроке вы:

познакомитесь с такими электромагнитными приборами, как реле, генератор и трансформатор; их устройствами и принципами работы; научитесь вычислять коэффициент трансформации.

Электромагнитное реле. В различных областях техники, особенно в автоматике, широко применяются электромагнитные приборы, называемые *реле*.

Основная часть всякого реле — электромагнит ЭМ (рис. 46.1). Когда по обмотке электромагнита проходит ток, якорь Я притягивается к электромагниту и скрепленная с ним пластинка В замыкает контакты К. Цепь электромагнита называется первичной цепью реле, а цепь, замыкаемая контактами К — вторичной. Когда в первичной цепи реле тока нет, пружина П оттягивает якорь и контакты К размыкаются. Это положение якоря на рисунке 46.1 показано пунктиром.

На рисунке 46.2 схематически показано применение реле для управления работой электродвигателя. Реле устанавливается около двигателя, который включен во вторичную цепь реле. Первичную цепь

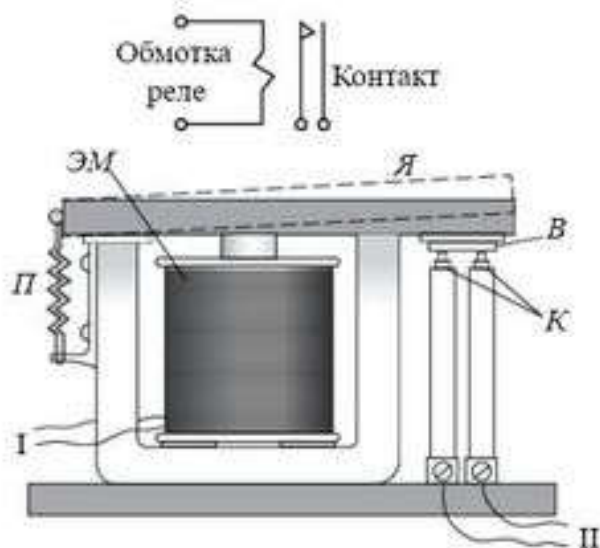


Рис. 46.1. Электромагнитное реле и его условные обозначения

Места включения

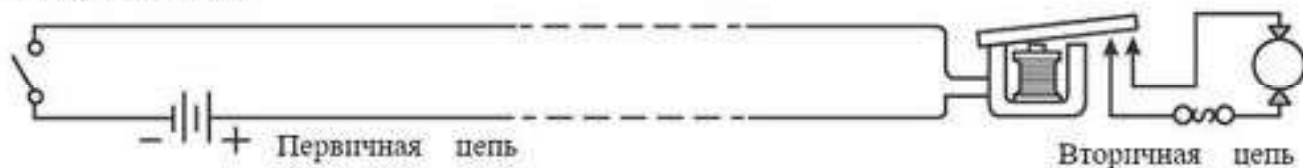


Рис. 46.2. Схема включения реле для пуска электродвигателя

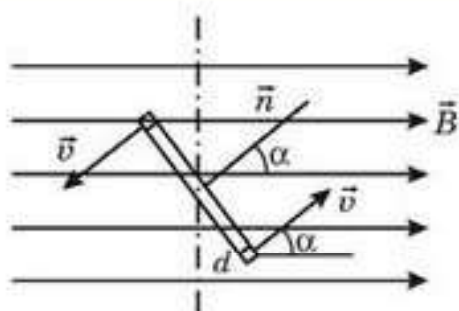


Рис. 46.3

реле включают с пульта управления, при этом якорь замкнет контакты вторичной цепи; реле, как говорят, “сработает”, двигатель приведет в действие нужную машину. Разомкнув цепь электромагнита, мы, тем самым, выключим и двигатель.

Без реле к месту включения двигателя пришлось бы подводить провода для тока, питающего двигатель. Для такой цепи понадобились бы толстые провода, а это

неэкономно. Ток, достаточный для приведения в действие реле, в десятки, а иногда и в тысячи раз меньше тока, питающего двигатель. Поэтому провода от пульта управления до реле могут быть малого сечения.

При помощи реле, расположенных в разных частях большого города, из одного центрального пункта ежедневно включают и выключают лампы уличного освещения.

Генератор. Принцип действия генератора основан на явлении электромагнитной индукции. Основным элементом генератора является рамка, вращающаяся в магнитном поле. Пусть в однородном постоянном магнитном поле индукцией \vec{B} вращается с постоянной угловой скоростью ω проволочная рамка площадью S (рис. 46.3).

Вспомним, что поток вектора магнитной индукции, пронизывающий рамку, определяется по формуле: $\Phi = BS \cos \alpha$, где α — угол между вектором индукции \vec{B} и нормалью \vec{n} к рамке. Пусть в начальном положении угол α равен нулю. При вращении рамки с угловой скоростью ω угол поворота рамки будет: $\alpha = \omega t$, тогда $\Phi = BS \cos \omega_0 t$, т. е. поток магнитной индукции меняется со временем по гармоническому закону. Если изменяется магнитный поток, пронизывающий контур, то в нем индуцируется ЭДС. Если взять очень малый промежуток времени

$\Delta t \rightarrow 0$, то $\mathcal{E} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left(-\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \right) = -\Phi'$.

Таким образом, ЭДС индукции определяется как первая производная от магнитного потока с обратным знаком:

$$\mathcal{E} = -\Phi' = -(BS \cos \omega t)' = BS \sin \omega t.$$

Обозначим $\mathcal{E}_m = BS \omega$ — максимальное значение ЭДС, индуцируемой в рамке. Тогда можно записать: $\mathcal{E} = \mathcal{E}_m \sin \omega t$.

Итак, в рамке, равномерно вращающейся в магнитном поле, наводится синусоидальная ЭДС индукции, следовательно, по рамке течет синусоидальный переменный ток. Чтобы использовать такой ток, используют генератор тока.

Генератором тока называется устройство, преобразующее какой-либо вид энергии в электрическую.

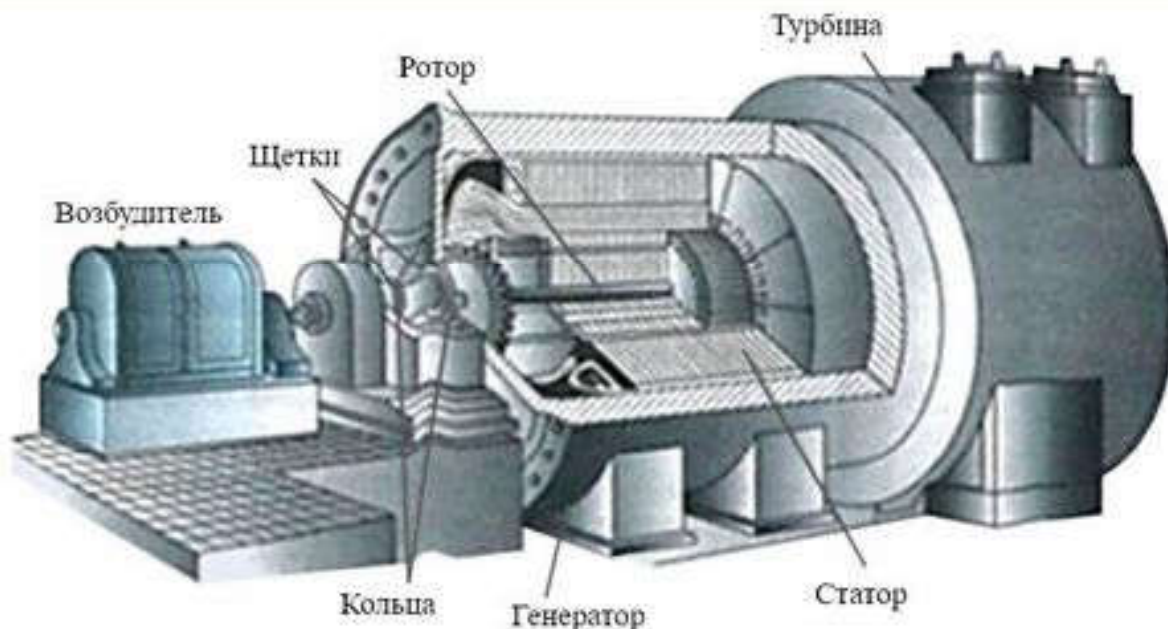


Рис. 46.4

На электростанциях используются различные модификации электро-механических индукционных генераторов переменного тока. В таких генераторах механическая энергия, за счет которой вращается вал, превращается в электрическую энергию. Основными частями любого индукционного генератора являются: *индуктор* — устройство, создающее магнитное поле (постоянный магнит или электромагнит); *якорь* — обмотка, в которой индуцируется ЭДС; *кольца со щетками* — устройство, которым снимают с вращающихся частей индукционный ток или подают ток питания электролитам.

Для увеличения генерируемой ЭДС вместо рамки используют ротор. На рисунке 46.4 изображена модель промышленного генератора.

При вращении ротора обмотки вращаются в магнитном поле статора, при этом пронизывающий их магнитный поток периодически изменяется. Эти изменения порождают вихревое электрическое поле, вследствие чего в обмотках возникает переменная ЭДС, которая “питает” внешнюю цепь. Для технических целей применяется переменный ток синусоидальной формы частотой 50 Гц, для этого ротор должен вращаться с частотой 50 об/с.

Трансформатор. Трансформаторы применяются для повышения и понижения напряжения на линии электропередачи (ЛЭП). В линии электропередачи, уменьшая силу тока, можно значительно снизить энергетические потери.

Прибор, осуществляющий трансформацию переменного тока, называется трансформатором.

Действие трансформатора основано на явлении электромагнитной индукции. Он позволяет в несколько раз увеличить или уменьшить переменное напряжение практически без потери мощности.

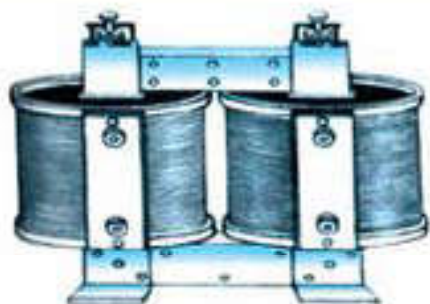


Рис. 46.5

Изменение напряжения переменного тока с одновременным изменением силы тока практически без изменения его мощности называется **трансформацией переменного тока**.

Трансформатор представляет собой замкнутый стальной сердечник, изготовленный из специальной трансформаторной стали. На сердечник надевают две индуктивно связанные обмотки (рис. 46.5). Одна из этих обмоток

включается в цепь переменного тока и называется *первичной*. Ко второй обмотке подключают потребителя, ее называют *вторичной* обмоткой.

Переменный ток, протекающий в первичной обмотке, создает в сердечнике трансформатора изменяющийся магнитный поток. Он возбуждает в каждом витке мгновенное значение ЭДС индукции первичной и такую же ЭДС индукции в каждом витке вторичной обмотки. Если число витков первичной катушки n_1 , а вторичной — n_2 , то $\mathcal{E}_1 = en_1$, $\mathcal{E}_2 = en_2$, где e — ЭДС индукции в одном витке любой из катушек. Отсюда: $\frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{n_1}{n_2}$. Если сопротивлением обмоток можно пренебречь, то ЭДС

индукции в них равны напряжению на их зажимах: $\mathcal{E}_1 = U_1$; $\mathcal{E}_2 = U_2$.

Изменение напряжения трансформатором характеризует коэффициент трансформации. Коэффициент трансформации — величина, равная отношению напряжений на первичной и вторичной обмотках

трансформатора: $\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2} = k$.

Повышающий трансформатор — трансформатор, увеличивающий напряжение ($U_2 > U_1$). У такого трансформатора число витков n_2 во вторичной обмотке должно быть больше числа витков n_1 в первичной обмотке, т. е. $k < 1$.

Понижающий трансформатор — трансформатор, уменьшающий напряжение ($U_2 < U_1$). У понижающего трансформатора число витков n_2 во вторичной обмотке должно быть меньше числа витков n_1 в первичной обмотке, т. е. $k > 1$.

Потери мощности в трансформаторах составляют 2—3% от мощности источника в первичной обмотке. Поэтому мощность тока в первичной обмотке $P_1 = U_1 I_1$ приблизительно равна мощности в цепи вторичной обмотки $P_2 = U_2 I_2$. Следовательно, $\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}$. При повышении напряжения с помощью трансформатора во столько же раз уменьшается сила тока и наоборот. Таким образом, подавая напряжение с электростанции на ЛЭП, повышают напряжение, уменьшая силу тока. Затем, когда ток приходит к потребителям, с помощью понижающего трансформатора понижают напряжение, увеличивая при этом силу тока.

Вопросы для самоконтроля

1. Как получают переменную ЭДС?
2. Что такое генератор? Каковы его устройство и принцип действия?
3. Почему основным элементом генератора является рамка, вращающаяся в магнитном поле?
4. В каких целях используется трансформатор?
5. Каковы устройство и принцип действия трансформатора?
6. Что такое коэффициент трансформации?

Что освоили по этой теме?

Насколько полезна и интересна была для вас полученная информация?	Что еще вы хотели бы узнать по данной теме?	Какие вопросы возникли у вас в ходе изучения темы?

§ 47. Магнитно-резонансная томография

Ключевые понятия: магнитно-резонансная томография, ядерно-магнитный резонанс, магнитное поле, радиоволны, магнитно-резонансная томография.

На этом уроке вы:

познакомитесь с устройством и принципом работы магнитно-резонансного томографа.

Три-четыре десятилетия назад докторам приходилось ставить диагноз, не имея ничего точнее рентгенологического исследования. Даже тогда это было диковинкой, о которой мало кто что-либо слышал. Сейчас существует множество точных исследований, которые помогают дать четкое представление о той или иной патологии, ее размерах, форме и опасности. Среди таких диагностических процедур есть и *магнитно-резонансная томография*.

Принцип работы магнитно-резонансной томографии. За принцип этой диагностической процедуры взят феномен ЯМР (ядерно-магнитный резонанс), при помощи которого можно получить послойное изображение органов и тканей организма (рис. 47.1).

Ядерно-магнитный резонанс — это физическое явление, которое заключается в особенных свойствах ядер атомов. При помощи импульса радиочастотной природы в электромагнитном поле в виде особого сигнала излучается энергия. Компьютер отображает и запечатлевает эту энергию.

ЯМР дает возможность знать об организме человека все из-за насыщенности последнего атомами водорода и магнитных свойств тканей организма. Установить, где находится тот или иной атом водорода,

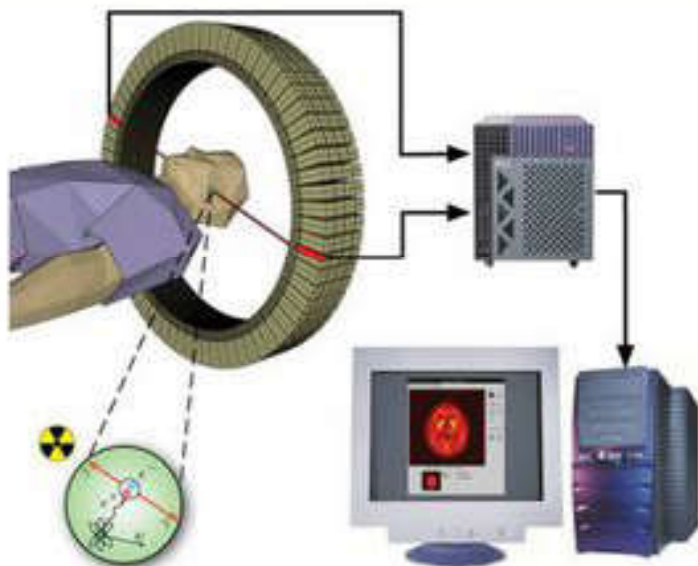


Рис. 47.1. Принцип работы МРТ

можно благодаря векторному направлению протонных параметров, которые делятся на две расположенные по разные стороны фазы, а также их зависимости от магнитного момента.

При помещении ядра атома во внешнее магнитное поле, момент магнитной природы направится в противоположную сторону от магнитного момента поля. Когда на определенный участок организма с той или иной частотой, воздействует электромагнитное излучение некоторые протоны изменяют свое направление, но затем все снова возвращается на круги своя. На этом этапе при помощи специальной системы в компьютере производится сбор данных, полученных с томографа, регистрируются несколько “расслабленных” ядер атома (рис. 47.1).

Магнитно-резонансная томография (МРТ) — один из методов лучевой диагностики, который может дать наиболее точные данные о состоянии организма человека, метаболизме, строении и физиологических процессах в тканях и органах (рис. 47.2).



Рис. 47.2. Современный аппарат МРТ

Во время исследования создаются снимки отдельных участков организма. Органы и ткани отображаются в разных проекциях, что дает возможность увидеть их в разрезе. После врачебной оценки таких снимков можно сделать достаточно точные выводы об их состоянии.

Принято считать, что МРТ была основана в 1973 году. Но первые томографы существенно отличались



Рис. 47.3. Работа с аппаратом МРТ

от современных. Прежде чем появились современные томографы, работающие качественно и точно, над их усовершенствованием трудились величайшие умы мира.

Современный магнитно-резонансный томограф — это высокотехнологичное устройство, работающее благодаря взаимодействию магнитного поля и радиоволн. Прибор выглядит как тоннельная труба с выдвижным столом, на котором и размещают пациента. Работа этого стола устроена так, что может перемещаться в зависимости от томографического магнита.

Обследуемый участок окружают радиочастотные датчики, считывающие сигналы и передающие их на компьютер. Полученные данные обрабатываются на компьютере, вследствие чего и получается точное изображение. Эти снимки записывают на пленку либо на диск (рис. 47.3).

В результате получается не снимок наподобие рентгеновского, а точное изображение необходимого участка в нескольких плоскостях. Можно посмотреть мягкие ткани в различных разрезах, при этом костная ткань не отображается, а значит — и мешать не будет.

При помощи этой методки можно визуализировать сосудистое русло, органы, различные ткани тела, нервные волокна, связочный аппарат и мышцы. Можно оценить скорость движения крови, измерить температуру любого органа.

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое магнитно-резонансная томография?
2. Что называется магнитно-резонансным томографом? Как он устроен и в чем заключается принцип его работы?
3. Когда была основана МРТ?
4. В каких целях применяется магнитно-резонансная томография?

Пример решения задачи

Найти индуктивность проводника, в котором равномерное изменение силы тока на 2 А в течение 0,25 с возбуждает ЭДС самоиндукции 20 мВ.

Решение. Из закона электромагнитной индукции и определения индуктивности следует равенство:

$$\mathcal{E} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = L \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

Из него получаем искомую формулу для индуктивности:

$$L = \frac{\mathcal{E}}{\Delta I / \Delta t}.$$

Вычисления:
$$L = \frac{2 \cdot 10^{-2} \text{ В} \cdot 0,25 \text{ с}}{2 \text{ А}} = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}.$$

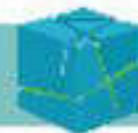
Ответ: $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}.$

Упражнение 17

1. Сколько витков должна иметь катушка, чтобы при изменении магнитного потока внутри нее от 24 мВб до 50 мВб за 32 с в ней создавалась средняя ЭДС индукции 10 В?
2. Катушка с железным сердечником имеет площадь поперечного сечения 20 см^2 и индуктивность 20 мГн. Какой должна быть сила тока, чтобы индукция магнитного поля в сердечнике равнялась 1 мТл? В катушке 1000 витков.
3. В вертикальном однородном магнитном поле с индукцией 0,2 Тл поступательно движется горизонтально расположенный проводник длиной 50 см со скоростью 10 м/с так, что его скорость составляет с магнитным полем угол 30° , а с осью проводника — 60° . Найдите ЭДС индукции, возникающей в проводнике.

Что освоили по этой теме?

Насколько полезна и интересна была для вас полученная информация?	Что еще вы хотели бы узнать по данной теме?	Какие вопросы возникли у вас в ходе изучения темы?



Раздел III. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

<p><i>Закон сохранения электрического заряда</i> : в электрически изолированной системе алгебраическая сумма электрических зарядов остается постоянной</p>	$q_1 + q_2 + \dots + q_n = \text{const}$
<p><i>Закон Кулона</i> : сила взаимодействия двух точечных зарядов прямо пропорциональна произведению величин этих зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними</p>	$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2}$
<p><i>Напряженность электрического поля</i> является его силовой характеристикой</p>	$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$
<p><i>Напряженность поля точечного заряда</i> q на расстоянии r от него</p>	$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}$
<p><i>Принцип суперпозиции электрических полей</i> : напряженность электрического поля системы зарядов равна векторной сумме напряженностей полей, связанных с каждым из них в отдельности</p>	$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n$
<p><i>Разность потенциалов</i> — это физическая величина, равная отношению работы, совершаемой силами поля при перемещении заряда из начальной точки в конечную, к этому заряду</p>	$(\phi_1 - \phi_2) = \frac{A}{q}$
<p><i>Работа по перемещению заряда</i> в электрическом поле равна произведению величины этого заряда на разность потенциалов</p>	$A = q (\phi_1 - \phi_2)$
<p><i>Емкость конденсатора</i> — физическая величина, равная отношению заряда конденсатора к разности потенциалов между его обкладками</p>	$C = \frac{q}{\phi_1 - \phi_2}$
<p>Емкость плоского конденсатора</p>	$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d}$

Продолжение

<p><i>Сила тока</i> — физическая величина, численно равная количеству заряда Δq, перенесенного через поперечное сечение проводника, за единицу времени Δt</p>	$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$
<p><i>Электродвижущая сила</i> — физическая величина, равная отношению работы, совершаемой сторонними силами по перемещению положительного заряда от отрицательного полюса источника тока к положительному, к величине этого заряда</p>	$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{ст}}}{q}$
<p><i>Напряжение</i> — физическая величина, равная отношению работы всех сил, действующих на данном участке, к значению переносимого заряда</p>	$U = \frac{A}{q}$
<p><i>Закон Ома для участка цепи</i> — сила тока на участке цепи прямо пропорциональна приложенному к нему напряжению и обратно пропорциональна сопротивлению этого же участка</p>	$I = \frac{U}{R}$
<p><i>Закон Ома для полной цепи</i> — сила тока в замкнутой цепи прямо пропорциональна действующей в ней ЭДС и обратно пропорциональна сумме ее внешнего и внутреннего сопротивлений</p>	$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$
<p><i>Работа тока на участке цепи</i> прямо пропорциональна силе тока, напряжению на участке и времени, в течение которого проходит ток</p>	$A = UIt$
<p><i>Закон Джоуля — Ленца</i> — количество теплоты, выделяемое в проводнике с током, равно произведению квадрата силы тока, сопротивления проводника и времени прохождения по нему электрического тока</p>	$Q = I^2 R t$
<p><i>Сила Ампера</i></p>	$F_A = BI \Delta l \sin \alpha$
<p><i>Сила Лоренца</i></p>	$F_L = Bq_0 v \sin \alpha$

Лабораторная работа № 1

Исследование движения шарика в жидкостях различной вязкости

Цель работы : определить значения коэффициента внутреннего трения по скорости падающего шарика в этой исследуемой жидкости.

Оборудование : Прибор для определения коэффициента внутреннего трения, набор шариков, микрометр, секундомер.

Краткая теория . При движении жидкости между слоями возникают силы внутреннего трения, которые стремятся уравнять скорости всех слоев жидкости.

Пусть два ближайших слоя жидкости, находящиеся на расстоянии ΔZ друг от друга, движутся по оси X с различными скоростями, отличающимися на величину ΔV (рис. 1).

Тогда на площадку ΔS между этими слоями будет действовать сила внутреннего трения (вязкости), величина которой равна:

$$F = \eta \frac{\Delta v}{\Delta Z} \Delta S, \quad (1)$$

где η — так называемый *динамический коэффициент внутреннего трения* или просто коэффициент вязкости, значение которого зависит от свойств жидкости и от температуры; $\frac{\Delta v}{\Delta Z}$ — так называемый *поперечный градиент скорости*, он показывает, как изменится скорость потока в направлении оси Z .

Решая уравнение (1) относительно η , находим:

$$\eta = \frac{F}{\frac{\Delta v}{\Delta Z} \Delta S}. \quad (2)$$

Следовательно, коэффициент внутреннего трения численно равен силе, действующей на единицу площади при градиенте скорости, равном единице. Размерность коэффициента внутреннего трения в системе СИ следующая:

$$[\eta] = \left[\frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}^2} \right] = \text{Па} \cdot \text{с} = 10 \text{ Пуаз}.$$

Единица коэффициента внутреннего трения в системе СИ — *пуаз*. Один пуаз равен $0,1 \text{ Па} \cdot \text{с}$.

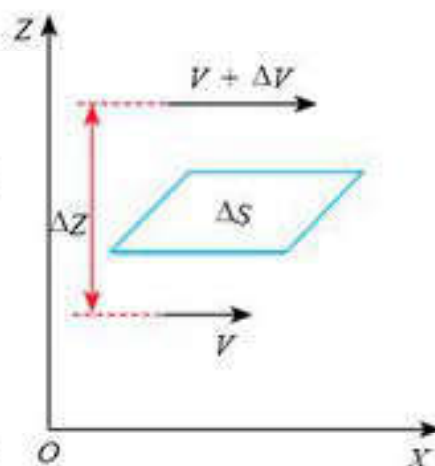


Рис. 1

Коэффициент вязкости является одной из важнейших характеристик смазочных материалов. Существует много способов определения коэффициента вязкости. Одним из наиболее простых и распространенных является способ, основанный на измерении скорости падения шарика в жидкости.

На шарик, находящийся в жидкости, действуют:

1. Сила тяжести, направленная вертикально вниз, равная:

$$F_{\text{тжк}} = m_{\text{ш}} \cdot g = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \cdot \rho_{\text{ш}} \cdot g.$$

2. Архимедова сила, направленная вертикально вверх, равная:

$$F_A = m_{\text{ж}} \cdot g = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot g,$$

где r — радиус шарика, g — ускорение силы тяжести, $\rho_{\text{ш}}$ — плотность материала шарика, $\rho_{\text{ж}}$ — плотность исследуемой жидкости.

Шарик под действием разности этих сил придет в ускоренное движение, так как сила тяжести больше выталкивающей силы.

3. Сила сопротивления, направленная вертикально вверх, вызванная вязкостью жидкости.

Для малых скоростей и для малых размеров тел эта сила выражается формулой:

$$F_c = 6\pi \cdot \eta \cdot r \cdot v. \quad (3)$$

Таким образом, величина силы сопротивления зависит от скорости: чем больше скорость движения, тем больше сила сопротивления. При падении шарика в жидкость его движение будет увеличиваться до тех пор, пока сила сопротивления не станет равной разности силы тяжести и архимедовой силы:

$$F_c = F_{\text{тжк}} - F_A.$$

$$6\pi \cdot \eta \cdot r \cdot v = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \cdot \rho_{\text{ш}} \cdot g - \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot g. \quad (4)$$

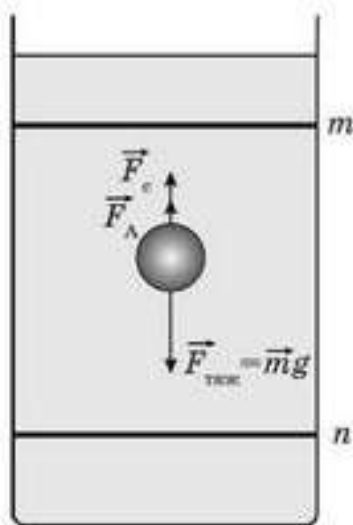


Рис. 2

Начиная с этого момента, шарик начинает двигаться равномерно с некоторой постоянной скоростью. Решая написанное уравнение относительно η , находим:

$$\eta = \frac{2}{9} \cdot \frac{\rho_{\text{ш}} - \rho_{\text{ж}}}{v} \cdot g \cdot r^2. \quad (5)$$

Описание работы. Основной частью прибора является высокий стеклянный цилиндр, наполненный исследуемой жидкостью (глицерин), (рис. 2). На стенках цилиндра на некотором расстоянии друг от друга нанесены две кольцеобразные метки m и n , соответствующие равномерному движению шарика в жидкости.

На дне цилиндра лежит металлическая сетка, на которую падают шарики. Эту сетку вместе с шариками можно вынуть из жидкости с помощью длинной ручки.

Ход работы

1. Измеряют микрометром диаметр шарика и находят его радиус, выражая в метрах.
2. Измеряют расстояние между метками на стенках цилиндра, выражая его в метрах.
3. Опустить шарик в жидкость как можно ближе к оси цилиндра.
4. Определить время t прохождения шариком расстояния между метками с помощью секундомера с точностью до 0,2 с.
5. Найти скорость падения шарика в этом интервале:

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

где l — расстояние между метками, t — время прохождения между метками.

6. Результаты измерений записать в таблицу.
7. Найти значение коэффициента вязкости исследуемой жидкости (5).
8. Аналогичные опыты проводят три раза, наблюдая падения 3-х шариков с различными диаметрами. По трем найденным значениям определить средний результат коэффициента внутреннего трения.
9. Относительная погрешность для одного из опытов определяется по следующей формуле:

$$E = \frac{\Delta\eta}{\eta_{\text{ср}}} = \frac{\Delta l}{l} + 2 \frac{\Delta r}{r} + \frac{\Delta t}{t} + \frac{\Delta\rho_{\text{ш}} + \Delta\rho_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ш}} - \rho_{\text{ж}}}.$$

10. Определить абсолютную погрешность одного измерения:
 $\Delta\eta = E \cdot \eta_{\text{ср}}.$

Значение коэффициента внутреннего трения η значительно меняется с изменением температуры. Поэтому, чтобы иметь возможность сравнивать найденное значение со справочными, необходимо измерить и записать температуру жидкости (табл. 1).

Таблица 1

№	Диаметр шарика D , м	Радиус шарика r , м	Расстояние между метками l , м	Время падения шарика t , с	Скорость падения шарика v , м/с	Коэффициент вязкости η , (Н·с)/м ²
1						
2						
3						
Среднее значение						

Лабораторная работа № 2

Исследование условия возникновения тока в электролитах

Цель работы : экспериментально определить условия возникновения тока в электролитах; определить заряд электрона и вольт-амперную характеристику (ВАХ) водного раствора хлорида натрия.

Оборудование : Два одиночных электрода, парный электрод, кювета, сосуд с водой, сосуд с солью, пробирка, длинный стержень, источник стабилизированного тока, миллиметровка, скотч, ножницы, шприц, салфетка, секундомер.

Краткая теория . Распад молекул на ионы под действием растворителя называется электролитической диссоциацией. Результатом электролитической диссоциации являются свободные носители электрического заряда (рис. 3).

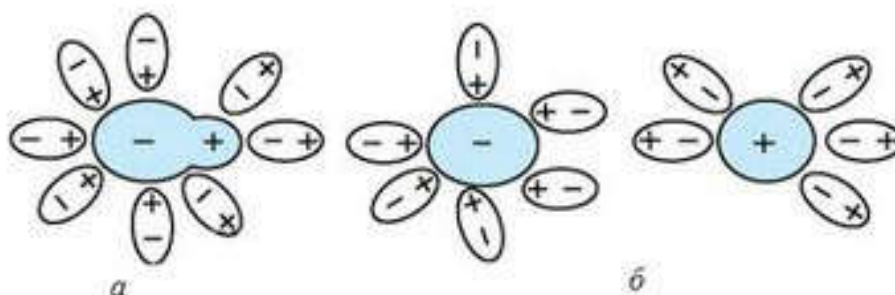


Рис. 3



Жидкие проводники, в которых свободными носителями заряда являются только ионы, называются *электролитами*.

Если в электролит опустить две пластинки и замкнуть их внешней цепью (одна пластинка — к положительному полюсу источника, другая — к отрицательному), то в этой цепи будет существовать электрический ток.

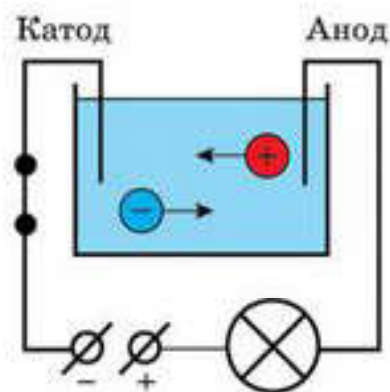


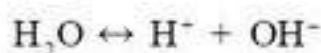
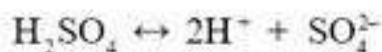
Рис. 4

Одна пластинка (+) называется анодом, другая (-) — катодом (рис. 4).

Положительные ионы, которые движутся к катоду, называются катионами.

Отрицательные ионы, которые движутся к аноду, называются анионами.

Ток в электролитах производит химическое действие. Например:



В этом случае на катоде образуется водород (H_2), на аноде — кислород (O_2) и вода (H_2O).

Ток в электролитах подчиняется закону Ома.

1. Масса вещества, выделяющаяся при электролизе, прямо пропорциональна количеству электричества, прошедшего через раствор.

$$m = q \cdot k, \quad q = I \cdot t \Rightarrow m = k \cdot I \cdot t,$$

где k — электрохимический эквивалент вещества

2. Электрохимический эквивалент вещества прямо пропорционален отношению атомной массы к его валентности.

$$k = \frac{A}{n} \cdot \frac{1}{F}, \quad \text{где } A \text{ — атомная масса, } n \text{ — валентность, } F \text{ — постоянная}$$

Фарадея $F = 9,648 \cdot 10^4$ Кл/моль.

Жидкости, как и твердые тела, могут быть проводниками, полупроводниками и диэлектриками. На этом уроке речь пойдет о жидкостях-проводниках. Причем не о жидкостях с электронной проводимостью (расплавленные металлы), а о жидкостях-проводниках второго рода (растворы и расплавы солей, кислот, оснований). Тип проводимости таких проводников — ионный.

Водный раствор хлорида натрия обладает хорошей проводимостью. При протекании через него электрического тока возникают процессы электролиза. В водном растворе молекулы хлорида натрия диссоциируют, образуя ионы, которые и являются носителями электрического заряда. В процессе электролиза на отрицательном электроде будет выделяться водород, а вблизи положительного электрода будет выделяться хлор и образовываться едкий натр. Обратите внимание, что процесс диссоциации происходит не мгновенно, поэтому при изменении напряжения ток устанавливается не сразу, а через некоторое время.

Если проводить электролиз, пропуская через раствор постоянный ток I в течение времени t , то между электродами пройдет заряд $Q = It$. Для переноса этого заряда необходимо $N = \frac{Q}{e} = \frac{It}{e}$ ионов, где e — заряд электрона. В процессе электролиза ионы водорода попарно объединяются и образуют газ водород. Соответственно в процессе электролиза образуется $n = \frac{N}{2} = \frac{It}{2e}$ молекул водорода.

Если собрать весь выделившийся водород, то для него можно записать $PV = nkT$. Зная давление, температуру и объем газа, можно в итоге вычислить заряд электрона.

Описание установки : Установка состоит из емкости с электролитом, двух электродов, источника постоянного тока и емкости для сбора газа (пробирки). Один из электродов имеет двойной изгиб, который позволяет закрепить на его конце пробирку в перевернутом состоянии.

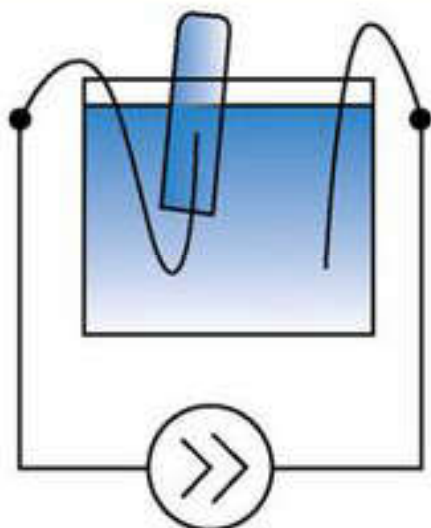


Рис. 5

При пропускании тока через электролит водород, выделяющийся на электроде, в виде маленьких пузырьков поднимается вверх. Если на этот электрод надеть перевернутую пробирку, как показано на рисунке 5, то весь водород окажется в ней.

Ход работы:

Часть 1.

1. Ознакомьтесь с принципами использования всех приборов, используемых в лабораторной работе.

2. Наполните большой сосуд водой практически до краев и поставьте его в кювету.

3. Получите у преподавателя соль, высыпьте её в сосуд и тщательно размешайте длинным стержнем. Соль должна полностью раствориться в воде.

4. Возьмите два одинарных электрода и закрепите их на диаметрально противоположных стенках сосуда проводами наружу (см. схему установки).

5. Из полоски миллиметровки изготовьте линейку (нанесите и подпишите деления). Получившуюся линейку скотчем приклейте к пробирке.

6. Возьмите пробирку и целиком погрузите её в сосуд с водой доньшком вниз. Пробирка должна полностью заполниться водой. Зажмите пальцем отверстие в пробирке, переверните её вверх дном и отпустите палец только, когда отверстие пробирки окажется под водой. Наденьте пробирку на загнутый электрод. В результате вы должны получить перевернутую пробирку, полностью заполненную водой (без пузырьков воздуха), надетую на загнутый электрод.

7. Тщательно вытрите руки тряпкой.

8. Подсоедините провода к источнику тока согласно схеме и соблюдая полярность.

9. На источнике выверните две правые ручки, отвечающие за регулировку напряжения на максимум (по часовой стрелке), а две левые ручки, отвечающие за регулировку тока, наоборот, на минимум. Переключатель на цифровом табло передвиньте вниз в режим отображения силы тока.

10. Включите источник. Левыми ручками грубой (Coarse) и точной (fine) настройки тока быстро установите силу тока в 25 мА (по показаниям встроенного в источник амперметра). Сразу же после установки заданной силы тока запустите секундомер.

11. Подождите примерно 30 минут.

12. Выключите источник и одновременно остановите секундомер.

Зафиксируйте показания секундомера.

13. Медленно поднимая пробирку вертикально вверх, добейтесь такого её положения, чтобы граница раздела между водой и водородом внутри пробирки совпадала с поверхностью воды в сосуде. Заметьте, напротив какого деления миллиметровки находится граница раздела.

14. Полностью вытащите пробирку из воды и вылейте из нее воду. Шприцем налейте в пробирку чистую воду до того уровня, который занимал водород. При этом по шкале шприца определите объем воды.

15. Отсоедините от источника электроды, вытащите их и тщательно вытрите салфеткой.

16. Определите заряд электрона. Оцените погрешность. Сделайте вывод.

Часть 2.

17. Поместите в воду двойной электрод.

18. Присоедините провода от сдвоенного электрода к плюсу и минусу источника.

19. Выкрутите на максимум регулировочные ручки, отвечающие за регулировку напряжения.

20. Включите источник. Ручками, отвечающими за регулировку тока, установите силу тока 25 мА. Подождите несколько минут, пока не установится напряжение.

21. Изменяя левыми ручками значение силы тока и определяя напряжение по встроенному в источник вольтметру, снимите зависимость силы тока через электролит от напряжения между электродами в диапазоне токов от 25 до 0 мА. Перед каждым измерением выждите 1—2 минуты, пока не установится напряжение при данной силе тока.

22. Постройте график этой зависимости.

23. Сделайте вывод.

Погрешности:

Погрешность шприца — 0,2 мл.

Погрешность секундомера — 0,5 с.

ФИЗИЧЕСКИЙ ПРАКТИКУМ

МЕХАНИКА

1. Измерение коэффициента трения скольжения

Оборудование : деревянная линейка, деревянный брусок, грузы из набора по механике массой по 100 г (4 шт.), динамометр.

Указания к выполнению работы :

1. Решите задачу: к бруску весом P прикрепили динамометр и стали равномерно тянуть его вдоль горизонтально расположенной деревянной линейки. Чему равен коэффициент трения скольжения дерева по дереву, если в процессе движения бруска динамометр показывал силу $F_{\text{упр}}$?

2. Воспользовавшись имеющимся оборудованием, измерьте значения величин, необходимых для нахождения коэффициента трения. Сила упругости $F_{\text{упр}}$, действующая на брусок, измеряется в процессе его движения, а вес бруска находится путем его взвешивания.

3. Полученные в ходе измерений данные ($F_{\text{упр}}$ и P) занесите в таблицу 1.

4. Воспользовавшись формулой, вычислите коэффициент трения:

$$\mu = \frac{F_{\text{тр}}}{P}.$$

Таблица 1

$P_{\text{бр}}, \text{Н}$	$P_{\text{гр}}, \text{Н}$	$P, \text{Н}$	$\Delta P, \text{Н}$	$F_{\text{тр}}, \text{Н}$	$\Delta F_{\text{тр}}, \text{Н}$	μ	Δ_{μ}	$\varepsilon_{\mu}, \%$

Обозначения величин: $P_{\text{бр}}$ — вес бруска; $P_{\text{гр}}$ — вес грузов; P — вес бруска с грузами; ΔP — граница абсолютной погрешности измерения веса бруска с грузами; $\Delta F_{\text{тр}}$ — граница абсолютной погрешности измерения силы трения; Δ_{μ} — граница абсолютной погрешности определения коэффициента трения; ε_{μ} — относительная погрешность определения коэффициента трения.

5. Измерьте вес бруска $P_{\text{бр}}$.

6. Положите брусок вблизи одного из концов линейки и прикрепите к нему динамометр. Потянув за динамометр, добейтесь равномерного движения бруска по линейке. Измерьте силу трения $F_{\text{тр}}$.

7. Измерьте вес одного груза $P_{\text{гр}}$. Вычислите суммарный вес бруска с грузом P .

8. Положите груз на брусок и повторите опыт. Повторите опыт с двумя, тремя и четырьмя грузами.

9. Внесите в таблицу границы абсолютных погрешностей измерения веса бруска с грузами ΔP и силы трения $\Delta F_{\text{тр}}$.

10. Вычислите значение коэффициента трения μ по результатам каждого опыта.

11. Для каждого значения μ вычислите границу абсолютной погрешности Δ_{μ} .
12. Для каждого значения μ вычислите относительную погрешность δ_{μ} .

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

2. Определение удельной теплоемкости твердого тела

Оборудование: калориметр, горячая и холодная вода, металлический цилиндр с нитью, термометр, мензурка, весы с гирями.

Указания к выполнению работы:

1. Решите задачу: в калориметр с водой, имеющей массу m_1 и температуру t_1 , опускают металлический цилиндр, имеющий массу m_2 и температуру t_2 ; чему равна удельная теплоемкость цилиндра, если после наступления теплового равновесия температура воды оказалась равной θ . Воспользуйтесь формулой:

$$C = \frac{\Delta Q}{m \Delta T}.$$

2. Налейте в калориметр воду массой $m_1 = 100 - 150$ г комнатной температуры.

3. Взвесив металлический цилиндр, нагрейте его в горячей воде и быстро опустите в калориметр.

4. Измерьте установившуюся температуру θ .

5. Результаты измерений занесите в таблицу 2.

Таблица 2

m_1 (кг)	c_s (Дж/кг $^{\circ}$ C)	t_1 ($^{\circ}$ C)	m_2 (кг)	t_2 ($^{\circ}$ C)	θ ($^{\circ}$ C)
	4200				

6. Воспользовавшись формулой, полученной в начале данной работы, вычислите удельную теплоемкость металла, из которого сделан цилиндр. Определите по справочнику, что это за металл.

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

3. Определение электрического сопротивления

Оборудование: проволочные резисторы (3 шт.), источник постоянного напряжения, амперметр, вольтметр, ключ, соединительные провода.

Указания к выполнению работы:

1. Соберите электрическую цепь, изображенную на рисунке 1.

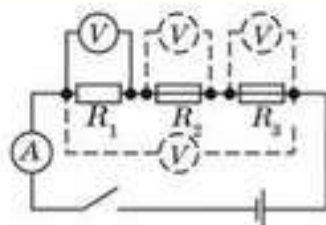


Рис. 1

2. Измерив силу тока в цепи, а также напряжения на различных участках, заполните таблицу 3.

Таблица 3

I	U_1	U_2	U_3	U	U_1	U_1	U_1	U_1

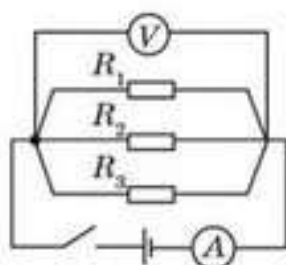


Рис. 2

Сравнив сумму сопротивлений отдельных резисторов ($R_1 + R_2 + R_3$) с общим сопротивлением R , сделайте вывод.

2. Соберите электрическую цепь, изображенную на рисунке 2. Измерив силу тока и напряжение, найдите общее сопротивление R .

Используя найденные в предыдущем задании сопротивления отдельных резисторов, заполните таблицу 4 и сделайте вывод.

Таблица 4

$1/R$	$1/R_1$	$1/R_2$	$1/R_3$

3. Определите экспериментальным путем общее сопротивление цепи, изображенной на рисунке 3, и сравните его с теоретически найденным.

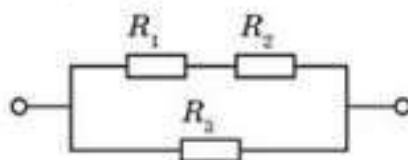


Рис. 3

4. Определение удельного сопротивления проводника

Оборудование: проволока из материала с неизвестным удельным сопротивлением, источник постоянного напряжения, амперметр, вольтметр, штангенциркуль, ключ, линейка, соединительные провода.

Указания к выполнению работы :

1. Решите задачу: чему равно удельное сопротивление провода длиной l и диаметром d , если при напряжении U через него идет ток I ?

Воспользуйтесь формулой для расчета удельного сопротивления проводника:

$$\rho = \frac{RS}{l}.$$

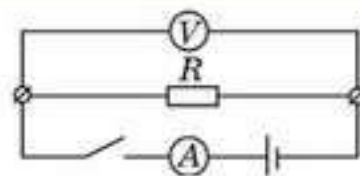


Рис. 4

2. Соберите электрическую цепь, изображенную на рисунке 4, и измерьте значения величин, необходимых для определения удельного сопротивления. Результаты измерений занесите в таблицу 5.

Таблица 5

D , мм	ΔD , мм	U , В	ΔU , В	I , А	ΔI , А	l , м	Δl , м	ρ , Ом·мм ² /м	$\Delta \rho$, Ом·мм ² /м

3. Воспользовавшись формулой, приведенной в начале данной работы, вычислите удельное сопротивление проводника.

5. Определение ЭДС и внутреннего сопротивления источника тока

Оборудование : источник тока, реостат, амперметр, вольтметр, ключ, соединительные провода.

Указания к выполнению работы :

1. Решите задачу: один и тот же источник тока сначала подключают к одному резистору, а затем к другому; в первом случае напряжение на полюсах источника оказывается равным U_1 , а сила тока в цепи — I_1 ; во втором случае соответственно U_2 и I_2 . Чему равны ЭДС и внутреннее сопротивление источника? Воспользуйтесь формулами:

$$\mathcal{E} = U + Ir,$$

где $U = IR$. Поэтому $r = \frac{\mathcal{E} - U}{I}$.

2. Соберите электрическую цепь, изображенную на рисунке 5, и при двух разных положениях ползунка реостата измерьте значения величин, необходимых для определения ЭДС и внутреннего сопротивления источника. Результаты измерений занесите в таблицу 6:

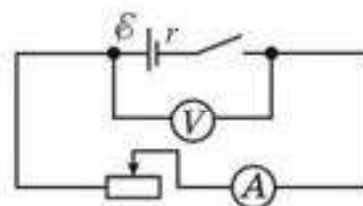


Рис. 5

Таблица 6

I_1, A	$U_1, \text{В}$	I_2, A	$U_2, \text{В}$	\mathcal{E}	r

3. Воспользовавшись формулами, полученными в начале данной работы, вычислите ЭДС и внутреннее сопротивление источника.

4. Отключите цепь от источника и с помощью вольтметра измерьте его ЭДС. Измеренные значения $\mathcal{E}_{\text{ист}}$ сравните с найденным в предыдущем задании.

6. Определение элементарного заряда методом электролиза

Оборудование : цилиндрический сосуд с раствором медного купороса, медные электроды, весы с гирями, амперметр, источник постоянного напряжения, реостат, часы, ключ, электрическая плитка, соединительные провода.

Указания к выполнению работы :

1. Решите задачу: при пропускании через раствор медного купороса тока I за время Δt на катоде выделилась медь массой m . Масса одного иона меди m_1 , валентность n . Чему равен элементарный заряд e ?

Для вычисления элементарного заряда e воспользуйтесь формулами, вытекающими из закона Фарадея:

$$m = kI \Delta t; \quad e = \frac{M}{mnN_A} \cdot I \Delta t \quad \text{или} \quad e = \frac{M}{(m_2 - m_1)nN_A} \cdot I \Delta t.$$

2. Используя весы, измерьте массу m_1 электрода, который будет служить в вашей работе катодом.

3. Соберите электрическую цепь, изображенную на рисунке 6, и, проделав необходимые измерения, заполните таблицу 7. Во время работы с помощью реостата старайтесь поддерживать силу тока в цепи постоянной (около 1 А). Перед повторным взвешиванием катода (после окончания электролиза) сполосните его водой и высушите над электроплиткой. Если его новая масса равна m_2 , то масса выделившейся на нем меди будет равна

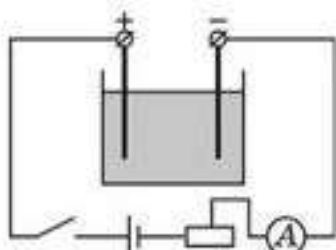


Рис. 6

$m = m_2 - m_1$.

Таблица 7

$m_1, \text{кг}$	$m_2, \text{кг}$	$m, \text{кг}$	$\Delta t, \text{с}$	$I, \text{А}$	$k, \text{кг/Кл}$	n	$m_1, \text{кг}$
			1200			2	$1,06 \cdot 10^{-25}$

4. Воспользовавшись формулами, полученными в начале данной работы, вычислите элементарный заряд.

Ответы к упражнениям

Упражнение 1.

2. 5 км. 3. 50 км; 250 км. 4. 5 с; 5. 2 м/с^2 . 6. 100 м. 8. 14 м/с; 32 м.

Упражнение 2.

1. 1250 Н. 2. 10 Н; 5 Н. 3. 4480 км. 4. 13590 км. 5. 39 м/с^2 , $9,8 \text{ м/с}^2$.

Упражнение 3.

2. 1 с; 8,66 м; 1,25 м. 3. 40 м. 4. 7,1 км/с. 5. 4000 м/с. 6. 669 км/с.

Упражнение 4.

1. 1,6 м/с. 2. 0,04 м/с. 3. 240 Дж. 4. 6800 Дж. 5. 4,9 Дж. 6. 2 м. 7. 3,1 Дж. 8. 8 м.
9. 1 Дж. 10. 40 Дж; 20 м.

Упражнение 7.

2. $1,5 \cdot 10^{26} \text{ м}^{-3}$. 3. $E = 5 \cdot 10^{-21} \text{ Дж}$.

Упражнение 8.

1. $15 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$. 2. $3 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

Упражнение 9.

5. Для обоих случаев КПД идеального теплового двигателя 0,93.

Упражнение 10.

1. $6,8 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$. 2. 18°C . 3. 61,4%.

Упражнение 11.

4. $1,8 \cdot 10^5 \text{ Н}$. 5. $1,5 \cdot 10^7 \text{ Н/Кл}$; $1,7 \cdot 10^{-5} \text{ Кл}$. 6. $1,6 \cdot 10^{-13} \text{ Н}$. 7. 10^3 Н/Кл . 8. $9 \cdot 10^4 \text{ Н/Кл}$.

Упражнение 12.

1. 600 В. 2. 1,1 кДж. 3. 500 В. 4. 220 В/м. 5. 5 мкФ. 6. $2 \cdot 10^{-3} \text{ Кл}$; 0,2 Дж.

Упражнение 13.

1. 100 В. 2. 12,5 Ом. 3. 122 м. 4. 0,5 А; 4 В. 5. 0,4 Ом.

Упражнение 14.

1. 294 Дж. 2. 60 Дж. 3. 6 кДж.

Упражнение 15.

1. 33 Вт. 2. 3,6 мКл. 3. 41 кВ.

Упражнение 16.

1. 0,3 Н; 0,15 Н; 0. 2. 0,3 Н; 0. 3. 1,7 А.

Упражнение 17.

1. 12300. 2. 0,1 А. 3. 0,435 В.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	4
-------------------	---

Раздел I. МЕХАНИКА

Глава 1. КИНЕМАТИКА

§ 1. Основные понятия и уравнения кинематики равноускоренного движения тела	5
§ 2. Относительное движение	13
§ 3. Кинематика криволинейного движения	16

Глава 2. ДИНАМИКА

§ 4. Силы. Сложение сил. Законы Ньютона	20
§ 5. Закон всемирного тяготения	24
§ 6. Движение снаряда в гравитационном поле	28

Глава 3. СТАТИКА И ГИДРОСТАТИКА

§ 7. Центр масс. Виды равновесия	33
§ 8. Сообщающиеся сосуды. Применение закона Паскаля	36
§ 9. Атмосферное давление. Опыт Торричелли	40

Глава 4. ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ

§ 10. Законы сохранения импульса и механической энергии	42
---	----

Глава 5. ГИДРОДИНАМИКА

§ 11. Кинематика жидкости	50
§ 12. Вязкая жидкость	54

Раздел II. ТЕПЛОВАЯ ФИЗИКА

Глава 6. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

§ 13. Основные положения молекулярно-кинетической теории газов	59
§ 14. Термодинамические параметры	66
§ 15. Кристаллические и некристаллические вещества	68

Глава 7. ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ

§ 16. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории газов	73
§ 17. Уравнение состояния идеального газа	78
§ 18. Изопроцессы	81

Глава 8. ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ

§ 19. Первый закон термодинамики	85
§ 20. Применение первого закона термодинамики к термодинамическим процессам	87
§ 21. Необратимость тепловых процессов в природе. Второй закон термодинамики	91
§ 22. Тепловые двигатели	94
§ 23. Роль тепловых двигателей и охрана окружающей среды	98

Глава 9. ЖИДКОСТИ И ТВЕРДЫЕ ТЕЛА

§ 24. Влажность воздуха, точка росы	102
§ 25. Поверхностное натяжение жидкости	105
§ 26. Смачивание. Капиллярные явления	109

Раздел III. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

Глава 10. ЭЛЕКТРОСТАТИКА

§ 27. Электрическое поле	115
§ 28. Конденсаторы. Электроемкость. Единицы измерения емкости и количества электричества	123

Глава 11. ПОСТОЯННЫЙ ТОК

§ 29. Электродвижущая сила источника тока и внутреннее сопротивление. Напряжение и разность потенциалов	127
§ 30. Законы Ома	132
§ 31. Работа и мощность электрического тока	135

Глава 12. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ

§ 32. Электрический ток в металлах	140
§ 33. Сверхпроводимость	144
§ 34. Электрический ток в полупроводниках	146
§ 35. Полупроводниковые приборы	152
§ 36. Электрический ток в электролитах	155
§ 37. Электрический ток в газах	159
§ 38. Электрический ток в вакууме	164

Глава 13. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

§ 39. Магнитное поле. Правило буравчика. Вектор магнитной индукции	169
§ 40. Сила Ампера	172
§ 41. Сила Лоренца	174
§ 42. Магнитные свойства вещества	178
§ 43. Искусственные магниты. Соленоид	181

Глава 14. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

§ 44. Закон электромагнитной индукции	185
§ 45. Правило Ленца	189
§ 46. Электромагнитные приборы	191
§ 47. Магнитно-резонансная томография	195

Лабораторная работа № 1. Исследование движения шарика в жидкостях различной вязкости	201
--	-----

Лабораторная работа № 2. Исследование условия возникновения тока в электролитах	204
---	-----

Физический практикум	208
----------------------------	-----

Механика	—
----------------	---

Молекулярная физика и термодинамика	209
---	-----

Электродинамика	—
-----------------------	---

Ответы к упражнениям	213
----------------------------	-----



Учебное издание

**Казахбаева Данагуль Мукажановна
Кронгарт Борис Аркадьевич
Токбергенова Уазипа Конурбаевна**

ФИЗИКА

Учебник для 10 классов
общественно-гуманитарного направления
общеобразовательных школ

Редактор *К. Амирова*
Худож. редактор *А. Сланова*
Техн. редактор *Л. Садыкова*
Корректор *Е. Дремкова*
Компьютерная верстка *И. Алмабаевой*

Государственная лицензия № 0000001 выдана издательству
Министерством образования и науки Республики Казахстан
7 июля 2003 года

ИБ № 5878

Подписано в печать 05.06.19. Формат 70×100^{1/16}. Бумага офсетная.
Гарнитура “SchoolBook Kza”. Печать офсетная. Усл.-печ. л. 17,42 + 0,32 форзац.
Усл. кр.-отг. 71,68. Уч.-изд. л. 8,25 + 0,54 форзац.
Тираж 25 000 экз. Заказ №

Издательство “Мектеп”, 050009, г. Алматы, пр. Абая, 143
Факс: 8(727) 394-37-58, 394-42-30,
Тел.: 8(727) 394-42-34.
E-mail: mektep@mail.ru
Web-site: www.mektep.kz

