

СПО

СРЕДНЕЕ
ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ
ОБРАЗОВАНИЕ

BOOK.ru
ONLINE МАТЕРИАЛЫ

СПРАВОЧНОЕ ПОСОБИЕ

Т.И. ТРОФИМОВА

ФИЗИКА ОТ А до Я

КНОРУС

СООТВЕТСТВУЕТ
ФГОС СПО 3+

**СРЕДНЕЕ
ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ
ОБРАЗОВАНИЕ**

ФГОС 3+

Т.И. ТРОФИМОВА

ФИЗИКА ОТ А до Я

Справочное пособие

Второе издание, стереотипное

BOOK.ru
ЭЛЕКТРОННО-БИБЛИОТЕЧНАЯ СИСТЕМА
КНОРУС • МОСКВА • 2016

УДК 373.167.1:54(075.32)

ББК 22.3я723

Т76

Автор

Т.И. Трофимова, профессор МИЭМ НИУ «Высшая школа экономики»

Трофимова Т.И.

Т76 Физика от А до Я : справочное пособие / Т.И. Трофимова. — 2-е изд., стер. — М. : КНОРУС, 2016. — 302 с. — (Среднее профессиональное образование).

ISBN 978-5-406-05127-6

DOI 10.15216/978-5-406-05127-6

Охватывает все разделы курса физики средней школы и содержит справочный материал, с помощью которого читатель может восстановить в памяти необходимые определения, законы и формулы. Каждая статья представляет собой краткий конспект ответа на соответствующий вопрос курса. Может быть эффективно использовано при подготовке к зачетам и экзаменам, при решении задач, для систематизации знаний по физике.

Соответствует ФГОС СПО 3+.

Для учащихся средних школ, лицеев, техникумов, а также абитуриентов и слушателей подготовительных отделений.

УДК 373.167.1:54(075.32)

ББК 22.3я723

Трофимова Таисия Ивановна

ФИЗИКА ОТ А ДО Я

Сертификат соответствия № РОСС RU.АГ51.Н03820 от 08.09.2015.

Изд. № 10812. Подписано в печать 05.10.2015. Формат 60×90/16.

Гарнитура «SchoolBookС». Печать офсетная.

Усл. печ. л. 19,0. Уч.-изд. л. 18,9. Тираж 500 экз.

ООО «Издательство «КноРус».

117218, г. Москва, ул. Кедрова, д. 14, корп. 2.

Тел.: 8-495-741-46-28.

E-mail: office@knorus.ru <http://www.knorus.ru>

Отпечатано в ООО «Контакт».

107150, г. Москва, проезд Подбельского 4-й, д. 3.

ISBN 978-5-406-05127-6

© Трофимова Т.И., 2016

© ООО «Издательство «КноРус», 2016

ПРЕДИСЛОВИЕ

Предлагаемое вашему вниманию справочное пособие охватывает все разделы курса физики средней школы. При создании пособия автор ставил перед собой две цели: во-первых, пособие должно содержать справочный материал, чтобы читатель мог быстро найти и восстановить в памяти необходимые определения, законы и формулы, а во-вторых, иметь обучающую направленность, поэтому практически каждая статья — краткий конспект ответа на соответствующие вопросы программы курса физики.

О структуре пособия. Материал скомпонован по следующим разделам физики: механика, молекулярная физика и термодинамика, электродинамика, колебания и волны, оптика, квантовая физика. Расположение материала в основном соответствует школьной программе. Исключение составляют механические и электромагнитные колебания и волны, которые рассматриваются вместе. Это обусловлено тем, что колебания и волны различной физической природы описываются одинаковыми характеристиками и адекватными уравнениями и их совместное рассмотрение, на наш взгляд, поможет более глубоко усвоению этой сложной темы. Все определения физических величин, наименования их единиц, а также сокращенные обозначения приведены в СИ.

Статьи в каждом разделе расположены в алфавитном порядке. Название каждой из них выделено жирным шрифтом и прописными буквами (например, **ИЗОТЕРМИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС**). Часто в статьях по мере изложения материала вводятся новые термины, которые отмечаются **жирным шрифтом и строчными буквами**, их определения выделяются *курсивом*. Для облегчения поиска терминов в конце пособия приведен предметный указатель по всем разделам. Если какое-либо слово в статье набрано **р а з р ы д к о й**, значит, в пособии есть либо отдельная статья с таким названием, либо в предметном указателе есть ссылка на рассматриваемый термин, к которой необходимо обратиться для получения дополнительных сведений.

Названия статей часто состоят из двух или большего числа слов. Если термин образован словосочетанием существительного и прилагательного, то на первое место вынесено прилагательное (например, **АТОМНОЕ ЯДРО, ХАРАКТЕРИСТИКИ**). Чтобы найти нужный термин, состоящий из нескольких слов, следует проверить его наличие по всем составляющим его словам. Если в названии статьи присутствует имя собственное, то оно выносится на первое место (например, **ЛЕНЦА ПРАВИЛО**).

Данное пособие может быть эффективно использовано при подготовке к экзаменам, решении задач, а также для систематизации и обобщения знаний по физике. Оно предназначено для учащихся средних школ, лицеев и гимназий, техникумов, абитуриентов и слушателей подготовительных отделений.

ВВЕДЕНИЕ

ГИПОТЕЗА — это научное предположение, выдвигаемое для объяснения какого-либо явления и требующее проверки на опыте и теоретического обоснования для того, чтобы стать достоверной научной теорией. Гипотезы выдвигаются для объяснения экспериментальных фактов.

ЕДИНИЦЫ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН. Единица физической величины — это физическая величина, которой по определению присвоено числовое значение, равное единице. Для построения системы единиц произвольно выбирают единицы для нескольких не зависящих друг от друга физических величин. Эти единицы называются **основными**. Остальные же величины и их единицы выводятся из законов, связывающих эти величины и их единицы с основными. Они называются **производными**.

В настоящее время обязательна к применению в научной, а также в учебной литературе Система интернациональная (СИ), которая строится на семи основных единицах — метр (единица длины), килограмм (единица массы), секунда (единица времени), ампер (единица силы электрического тока), кельвин (единица температуры), моль (единица количества вещества), кандела (единица силы света) — и двух дополнительных — радиан (единица плоского угла) и стерадиан (единица телесного угла).

Метр (м) — длина пути, проходимого светом в вакууме за $1/299\,792\,458$ с.

Килограмм (кг) — масса, равная массе международного прототипа килограмма (платиноиридиевого цилиндра, хранящегося в Международном бюро мер и весов в Севре, близ Парижа).

Секунда (с) — время, равное $9\,192\,631\,770$ периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133.

Ампер (А) — сила неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 м один от другого, создает между этими проводниками силу, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н на каждый метр длины.

Кельвин (К) — $1/273,16$ часть термодинамической температуры тройной точки воды.

Моль (моль) — количество вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько атомов содержится в нуклиде ^{12}C массой 0,012 кг.

Кандела (кд) — сила света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой $5,4 \cdot 10^{14}$ Гц, энергетическая сила света которого в этом направлении составляет 1/683 Вт/ср.

Радиян (рад) — угол между двумя радиусами окружности, длина дуги между которыми равна радиусу.

Стерadian (ср) — телесный угол с вершиной в центре сферы, вырезающий на поверхности сферы площадь, равную площади квадрата со стороной, равной радиусу сферы.

Для установления производных единиц используют физические законы, связывающие их с основными единицами. Например, из формулы равномерного прямолинейного движения $v = s/t$ (s — пройденный путь, t — время) производная единица скорости получается равной 1 м/с.

МАТЕРИЯ — окружающий нас мир, все существующее вокруг нас и обнаруживаемое нами посредством ощущений. Неотъемлемым свойством материи и формой ее существования является движение. Движение в широком смысле слова — это всевозможные изменения материи — от простого перемещения до сложнейших процессов мышления.

ОПЫТ (основной метод исследования в физике) — основанное на практике чувственно-эмпирическое познание объективной действительности, т. е. наблюдение исследуемых явлений в точно учитываемых условиях, позволяющих следить за ходом явлений и многократно воспроизводить его при повторении этих условий.

ФИЗИКА — наука о наиболее простых и вместе с тем наиболее общих формах движения материи и их взаимных превращениях. Изучаемые физикой формы движения материи (механическая, тепловая и др.) присутствуют во всех высших и более сложных формах движения материи (химических, биологических и др.). Поэтому они, будучи наиболее простыми, являются в то же время наиболее общими формами движения материи. Высшие и более сложные формы движения материи — предмет изучения других наук (химии, биологии и др.).

Академик А. Ф. Иоффе определил физику как *науку, изучающую общие свойства и законы движения вещества и поля*. В настоящее время общепризнано, что все взаимодействия осуществляются посредством полей, например гравитационных, электромагнитных, полей ядерных сил. Поле, наряду с веществом, является одной из форм существования материи.

Физика тесно связана с естественными науками. Эта теснейшая связь физики с другими отраслями естествознания, как отмечал академик С. И. Вавилов, привела к тому, что физика глубочайшими корнями выросла в астрономию, геологию, химию, биологию и другие естественные науки. В результате образовался ряд новых смежных дисциплин, таких, как астрофизика, биофизика и др.

Физика тесно связана и с техникой, причем эта связь имеет двусторонний характер. Физика выросла из потребностей техники (развитие механики у древних греков, например, было вызвано запросами строительной и военной техники того времени), и техника, в свою очередь, определяет направление физических исследований (например, в свое время задача создания наиболее экономичных тепловых двигателей вызвала бурное развитие термодинамики). С другой стороны, от развития физики зависит технический уровень производства. Физика — база для создания новых отраслей техники (электронная техника, ядерная техника и др.).

ФИЗИЧЕСКИЕ ЗАКОНЫ — *это устойчивые повторяющиеся объективные закономерности, существующие в природе*. Их устанавливают при обобщении экспериментальных фактов (иногда даже многовековых), а также результатов деятельности людей. Наиболее важные законы определяют связь между физическими величинами. Для этого необходимо измерять физические величины. Измерение физической величины есть действие, выполняемое с помощью средств измерений для нахождения значения физической величины в принятых единицах. Единицы физических величин можно выбрать произвольно, но тогда возникнут трудности при их сравнении. Поэтому целесообразно ввести систему единиц, охватывающую единицы всех физических величин (см. Единицы физических величин).

МЕХАНИКА

АРХИМЕДА ЗАКОН — один из основных законов гидродинамики: на тело, погруженное в жидкость (газ), действует со стороны этой жидкости (газа) направленная вверх выталкивающая сила, равная весу вытесненной телом жидкости (газа) и приложенная к центру тяжести вытесненного объема:

$$F_A = \rho g V,$$

где ρ — плотность жидкости, V — объем погруженной в жидкость части тела.

На законе Архимеда основана теория плавания тел в жидкостях и газах. Если вес тела P меньше силы Архимеда ($P < F_A$), то тело всплывает до тех пор, пока не будет выполнено условие $\rho g V = P$, если же $P > F_A$, то тело тонет.

БЕРНУЛЛИ УРАВНЕНИЕ связывает скорость и давление в потоке идеальной жидкости (физическая модель, т. е. воображаемая жидкость, в которой отсутствуют силы внутреннего трения):

$$\frac{\rho v^2}{2} + \rho g h + p = \text{const},$$

где ρ — плотность жидкости, v — скорость жидкости в сечении трубки тока, находящейся на высоте h , p — статическое давление жидкости (давление жидкости на поверхность обтекаемого ею тела) для определенного сечения трубки тока,

$\frac{\rho v^2}{2}$ — динамическое давление, ρgh — гидростатическое давление.

Уравнение Бернулли для горизонтальной трубки тока имеет вид:

$$\frac{\rho v^2}{2} + p = \text{const},$$

где $\frac{\rho v^2}{2} + p$ называется **полным давлением**.

Уравнение Бернулли выражает закон сохранения энергии применительно к установившемуся течению идеальной жидкости. Оно также хорошо выполняется и для реальных жидкостей, в которые внутреннее трение которых не очень велико.

Из уравнения Бернулли для горизонтальной трубки тока и уравнения неразрывности $Sv = \text{const}$ следует, что при течении жидкости по горизонтальной трубе, имеющей различные сечения, скорость жидкости больше в местах сужения, а статическое давление больше в более широких местах, т. е. там, где скорость меньше. Это означает, что в местах сужения трубопровода скорость течения жидкости возрастает, а давление понижается. Отметим, что уравнение неразрывности и уравнение Бернулли применимы также и к газам в тех случаях, когда сжимаемостью и вязкостью газа можно пренебречь.

ВЕКТОР ПЕРЕМЕЩЕНИЯ. Пусть материальная точка движется вдоль произвольной траектории (рис. 1). Отсчет времени начнем с момента, когда точка находилась в положении A . Длина участка траектории AB , пройденного материальной точкой с момента начала отсчета времени, называется **длиной пути** Δs и является **скалярной функцией** времени:

$$\Delta s = \Delta s(t).$$

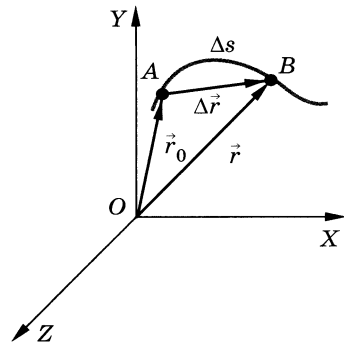


Рис. 1

Вектор $\Delta\vec{r} = \vec{r} - \vec{r}_0$, проведенный из начального положения движущейся точки в положение ее в данный момент времени (приращение радиуса-вектора точки за рассматриваемый промежуток времени), называется **вектором перемещения**.

Пути, пройденные точкой за последовательные промежутки времени, складываются *арифметически*, а векторы перемещений складываются *геометрически* (по правилу сложения векторов).

При прямолинейном движении вектор перемещения совпадает с соответствующим участком траектории и модуль перемещения $|\Delta\vec{r}|$ равен пройденному пути Δs :

$$|\Delta\vec{r}| = \Delta s.$$

ВЕС ТЕЛА — сила, с которой тело вследствие тяготения к Земле действует на опору (или подвес), удерживающую тело от свободного падения. С и л а т я ж е с т и F_T приложена к телу, а вес тела P приложен к опоре (или подвесу).

Сила тяжести действует всегда, а вес проявляется только в том случае, когда на тело кроме силы тяжести действуют еще другие силы, вследствие чего тело движется с ускорением \vec{a} , отличным от \vec{g} . Если тело движется в поле тяготения Земли с ускорением $\vec{a} \neq \vec{g}$, то к этому телу приложена дополнительная сила \vec{N} , удовлетворяющая условию:

$$\vec{N} + \vec{F}_T = m\vec{a}.$$

Тогда вес тела

$$\vec{P} = -\vec{N} = \vec{F}_T - m\vec{a} = m\vec{g} - m\vec{a} = m(\vec{g} - \vec{a}),$$

т. е. если тело покоится или движется прямолинейно и равномерно, то $\vec{a} = 0$ и $\vec{P} = m\vec{g}$. Если тело *свободно движется в поле тяготения* по любой траектории и в любом направлении, то $\vec{a} = \vec{g}$ и $\vec{P} = 0$, т. е. *тело будет невесомым*.

Невесомость — состояние тела, при котором оно движется только под действием силы тяжести. Например, невесомыми являются тела, находящиеся в космических кораблях, свободно движущихся в космосе.

Внешние силы — силы, с которыми на материальные точки механической системы действуют внешние тела.

Внутренние силы — силы взаимодействия между материальными точками механической системы.

Вязкость (внутреннее трение) — свойство *реальных жидкостей* оказывать сопротивление перемещению одной части жидкости относительно другой. При перемещении одних слоев реальной жидкости относительно других возникают силы внутреннего трения, направленные по касательной к поверхности слоев. Действие этих сил проявляется в том, что со стороны слоя, движущегося быстрее, на слой, движущийся медленнее, действует ускоряющая сила. Со стороны же слоя, движущегося медленнее, на слой, движущийся быстрее, действует тормозящая сила.

Сила внутреннего трения \vec{F} тем больше, чем больше рассматриваемая площадь поверхности слоя S (рис. 2), и зависит от того, насколько быстро меняется скорость течения жидкости при переходе от слоя к слою. На рис. 2 представлены два слоя, отстоящие друг от друга на расстоянии Δy и движущиеся со скоростями \vec{v}_1 и \vec{v}_2 . Направление, в котором отсчитывается расстояние между слоями, *перпендикулярно* скорости течения слоев. Величина

$\frac{\Delta v}{\Delta y}$ показывает, как быстро меняется скорость при переходе от слоя к слою в направлении y , перпендикулярном направлению движения слоев, и называется **градиентом скорости**. Модуль силы внутреннего трения между слоями жидкости

$$F = \eta \left| \frac{\Delta v}{\Delta y} \right| S,$$

где коэффициент пропорциональности η , зависящий от природы жидкости, называется **динамической вязкостью** (или просто **вязкостью**).

Единица вязкости — **паскаль-секунда** ($\text{Па} \cdot \text{с}$): $1 \text{ Па} \cdot \text{с}$ равен динамической вязкости среды, в которой при **ламинарном**

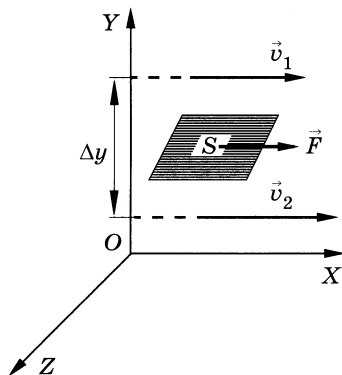


Рис. 2

течении и градиенте скорости с модулем, равным 1 м/с на 1 м, возникает сила внутреннего трения 1 Н на 1 м² поверхности касания слоев (1 Па · с = 1 Н · с/м²).

Чем больше вязкость, тем сильнее жидкость отличается от идеальной, тем бóльшие силы внутреннего трения в ней возникают. Вязкость зависит от температуры, причем характер этой зависимости для жидкостей и газов различен (для жидкостей η с увеличением температуры уменьшается, у газов, наоборот, увеличивается), что указывает на различие в них механизмов внутреннего трения. Особенно сильно от температуры зависит вязкость масел. Например, вязкость касторового масла в интервале 18—40 °С падает в четыре раза. Российский физик П. Л. Капица открыл, что при температуре 2,17 К жидкий гелий переходит в сверхтекучее состояние, в котором его вязкость равна нулю.

ГАЛИЛЕЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ КООРДИНАТ. Рассмотрим две системы отсчета: и н е р ц и а л ь н у ю с и с т е м у K (с координатами x, y, z), которую условно будем считать неподвижной, и систему K' (с координатами x', y', z'), движущуюся относительно K равномерно и прямолинейно со скоростью \vec{u} ($\vec{u} = \text{const}$). Отсчет времени начнем с момента, когда начала координат обеих систем совпадают. Пусть в произвольный момент времени t расположение этих систем друг относительно друга имеет вид, изображенный на рис. 3. Скорость \vec{u} направлена вдоль OO' , радиус-вектор, проведенный из O в O' , $\vec{r}_0 = \vec{u}t$.

Найдем связь между координатами произвольной точки A в обеих системах. Из рисунка следует, что

$$\vec{r} = \vec{r}' + \vec{r}_0 = \vec{r}' + \vec{u}t. \quad (1)$$

Уравнение (1) можно записать в проекциях на оси координат:

$$\begin{cases} x = x' + u_x t, \\ y = y' + u_y t, \\ z = z' + u_z t. \end{cases} \quad (2)$$

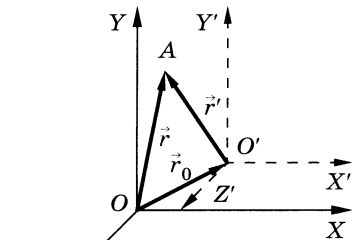


Рис. 3

Уравнения (1) и (2) называют **преобразованиями координат Галилея**.

В частном случае, когда система K' движется со скоростью \vec{u} вдоль положительного направления оси X системы K (в начальный момент времени оси координат совпадают), преобразования координат Галилея имеют вид:

$$x = x' + vt, \quad y = y', \quad z = z'.$$

В классической механике предполагается, что ход времени не зависит от относительного движения систем отсчета, т. е. к преобразованиям (2) можно добавить еще одно уравнение:

$$t = t'.$$

Записанные соотношения справедливы лишь в случае классической механики ($u \ll c$), а при скоростях, сравнимых со скоростью света, преобразования Галилея заменяются более общими преобразованиями Лоренца.

ГАЛИЛЕЯ ПРИНЦИП ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ: *во всех инерциальных системах отсчета законы классической механики имеют одинаковую форму.*

Для подтверждения этого вывода рассмотрим преобразования координат Галилея

$$\vec{r} = \vec{r}' + \vec{u}t,$$

продифференцировав их по времени (с учетом, что $t = t'$), получим уравнение

$$\vec{v} = \vec{v}' + \vec{u},$$

которое представляет собой **закон сложения скоростей в классической механике**.

Ускорение в системе отсчета K

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d(\vec{v}' + \vec{u})}{dt} = \frac{d\vec{v}'}{dt} = \vec{a}'.$$

Таким образом, ускорение точки A в системах отсчета K и K' , движущихся друг относительно друга равномерно и прямолинейно, одинаково:

$$\vec{a} = \vec{a}'.$$

Следовательно, если на точку A другие тела не действуют ($\vec{a} = 0$), то и $\vec{a}' = 0$, т. е. система K' является инерциальной

(точка движется относительно нее равномерно и прямолинейно или покоится). Отсюда и вытекает подтверждение принципа относительности Галилея: *уравнения динамики при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой не изменяются*. Галилей обратил внимание, что никакими механическими опытами, проведенными в данной инерциальной системе отсчета, нельзя установить, покоится она или движется равномерно и прямолинейно. Например, сидя в каюте корабля, движущегося равномерно и прямолинейно, мы не можем определить, покоится корабль или движется, не выглянув в окно.

ГИДРОАЭРОМЕХАНИКА — раздел механики, в котором изучается равновесие и движение жидкостей и газов, их взаимодействия между собой и обтекаемыми ими твердыми телами. К изучению жидкостей и газов применяется *единый подход*. Хотя свойства жидкостей и газов во многом отличаются, но в ряде механических явлений их поведение описывается одинаковыми параметрами и идентичными уравнениями. Кроме того, из опыта известно, что сжимаемостью жидкости и газа во многих задачах можно пренебречь. Поэтому пользуются единым понятием **несжимаемой жидкости** — жидкости, плотность которой всюду одинакова и не изменяется со временем. Гидроаэродинамика подразделяется на гидродинамику и гидростатику.

Гидродинамика — раздел гидроаэромеханики, в котором изучается движение несжимаемых жидкостей и их взаимодействие с твердыми телами.

Гидростатика — раздел гидроаэромеханики, в котором изучаются равновесие несжимаемой жидкости и воздействие покоящейся жидкости на погруженные в нее тела.

ГИДРОСТАТИЧЕСКОЕ ДАВЛЕНИЕ. Рассмотрим, как влияет вес жидкости на распределение давления внутри покоящейся несжимаемой жидкости. При равновесии жидкости давление по горизонтали всегда одинаково, иначе жидкость не находилась бы в состоянии покоя. Поэтому свободная поверхность покоящейся жидкости всегда горизонтальна вдали от стенок сосуда. Если жидкость несжимаема, то ее плотность не зависит от давления. При поперечном сечении S столба жидкости, его высоте h и плотности

жидкости ρ вес столба жидкости $P = \rho gSh$, а давление на нижнее основание сосуда

$$p = \frac{P}{S} = \frac{\rho gSh}{S} = \rho gh,$$

т. е. давление изменяется линейно с высотой. Давление, обусловленное силой тяжести и зависящее от глубины под поверхностью жидкости, называется **гидростатическим давлением**. Выталкивающая сила (см. **Архимедов закон**) как раз и возникает из-за того, что значения гидростатического давления на разных глубинах различны.

ДАВЛЕНИЕ — физическая величина, определяемая модулем силы, действующей на единицу площади поверхности тела перпендикулярно к ней:

$$p = \frac{\Delta F_n}{\Delta S}.$$

Если силы распределены вдоль поверхности равномерно, то $p = \frac{F}{S}$.

Единица давления — **паскаль (Па)**: 1 Па равен давлению, создаваемому силой 1 Н, равномерно распределенной по нормальной к ней поверхности площадью 1 м^2 ($1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$).

ДАВЛЕНИЕ ЖИДКОСТИ — физическая величина, определяемая нормальной силой, действующей со стороны жидкости на единицу площади:

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

ДВИЖЕНИЕ ТЕЛА, БРОШЕННОГО ВЕРТИКАЛЬНО ВВЕРХ. Это движение удобно рассматривать в два этапа (рис. 4).

1) *Движение вертикально вверх с начальной скоростью v_0 и ускорением $a = -g$.* В высшей точке подъема скорость тела $v_t = 0$. Тогда из соотношений

$$\begin{cases} 0 = v_0 - gt, \\ 0 - v_0^2 = -2gh \end{cases}$$

можно определить время и высоту подъема:

$$t = \frac{v_0}{g}, \quad h = \frac{v_0^2}{2g}.$$

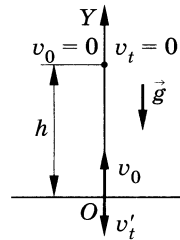


Рис. 4

2) Свободное падение от максимальной точки подъема. Обозначив за v'_t конечную скорость падения, t' — время падения и учитывая, что высота падения равна высоте подъема, можно записать:

$$\begin{cases} v'_t = 0 + gt', \\ (v'_t)^2 - 0 = 2gh = 2g \frac{v_0^2}{g}, \end{cases}$$

откуда следует, что $v'_t = v_0$ и $t' = t$, т. е. конечная скорость падения равна начальной скорости бросания, время падения равно времени подъема. Сопротивление воздуха при расчетах не учитывалось.

ДВИЖЕНИЕ ТЕЛА, БРОШЕННОГО ГОРИЗОНТАЛЬНО. Движение тела, брошенного горизонтально с начальной скоростью \vec{v}_0 с высоты h , можно рассматривать как результат двух независимых движений (рис. 5):

1) горизонтального равномерного со скоростью $\vec{v}_0 = \text{const}$;

2) вертикального свободного падения с ускорением \vec{g} ($v_{0y} = 0$).

Траектория тела, брошенного горизонтально, представляет собой параболу, и уравнение траектории в системе координат XU имеет вид:

$$y = \frac{g}{2v_0} x^2$$

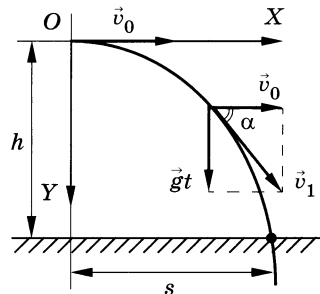


Рис. 5

(получено при исключении времени из уравнений $x = v_0 t$;

$$y = \frac{gt^2}{2}).$$

Вектор мгновенной скорости \vec{v} в каждой точке траектории направлен по касательной к ней и в любой момент времени t определяется из уравнения:

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{g}t,$$

а модуль мгновенной скорости рассчитывается по формуле:

$$v = \sqrt{v_0^2 + g^2 t^2}.$$

Горизонтальная дальность полета

$$s = v_0 \sqrt{\frac{2h}{g}}$$

(получена из уравнения движения по горизонтали $s = v_0 t$. Так как время движения по горизонтали равно времени свободного падения, то время t можно определить по заданной высоте $h = \frac{gt^2}{2}$). Сопротивление воздуха при расчетах не учитывалось.

ДВИЖЕНИЕ ТЕЛА, БРОШЕННОГО ПОД УГЛОМ К ГОРИЗОНТУ. Движение тела, брошенного под углом α к горизонту с начальной скоростью \vec{v}_0 (рис. 6), складывается из:

1) *горизонтального равномерного движения со скоростью $v_x = v_{0x} = \text{const}$;*

2) *движения тела, брошенного вертикально вверх с начальной скоростью v_{0y} .*

Учитывая, что проекции начальной скорости на оси координат

$$v_{0x} = v_0 \cos \alpha,$$

$$v_{0y} = v_0 \sin \alpha,$$

получим уравнения для проекции скорости в любой момент времени *при подъеме* до верхней точки траектории:

$$v_x = v_0 \cos \alpha,$$

$$v_y = v_0 \sin \alpha - gt.$$

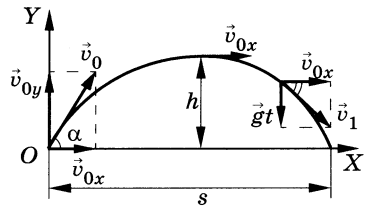


Рис. 6

Из рис. 6 следует, что модуль мгновенной скорости в каждой точке траектории

$$\text{при подъеме: } v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{(v_0 \cos \alpha)^2 + (v_0 \sin \alpha + gt)^2},$$

$$\text{при спуске: } v_1 = \sqrt{v_{0x}^2 + (gt)^2} = \sqrt{v_0^2 \cos^2 \alpha + g^2 t^2}.$$

Основные формулы для движения тела, брошенного под углом к горизонту:

$$\text{время подъема: } t_n = \frac{v_0 \sin \alpha}{g}$$

(в верхней точке $v_y = 0$; $0 = v_0 \sin \alpha - gt_n$),

$$\text{общее время движения: } t_{\text{общ}} = \frac{2v_0 \sin \alpha}{g}$$

(время подъема равно времени падения),

$$\text{дальность броска: } s = \frac{v_0^2 \sin \alpha}{g}$$

($s = v_{0x} t_{\text{общ}} = v_0 t_{\text{общ}} \cos \alpha$),

$$\text{максимальная высота подъема: } h_{\text{max}} = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g}$$

$$\left(h = v_{0y} t_n - \frac{gt_n^2}{2} = v_0 t_n \sin \alpha - \frac{gt_n^2}{2} \right).$$

Сопротивление воздуха при расчетах не учитывалось.

ДИССИПАТИВНАЯ СИЛА — сила, работа которой при перемещении точки (тела) из одного положения в другое зависит от траектории движения точки (тела).

ДИССИПАТИВНАЯ СИСТЕМА — система, в которой механическая энергия постепенно уменьшается за счет преобразования в другие (немеханические) формы энергии, т. е. система, в которой происходит **диссипация (рассеяние) энергии**.

ДЛИНА ТЕЛ В РАЗНЫХ СИСТЕМАХ ОТСЧЕТА. Если в системе отсчета K , относительно которой стержень покоится, его длина l_0 (стержень расположен вдоль оси OX), то в системе K' , относительно которой стержень движется со скоростью v , его длина

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \text{ — так называемое лоренцево сокращение длины.}$$

Таким образом, длина движущегося стержня меньше длины, измеренной в системе, относительно которой он покоится (меньше *собственной длины*) и в разных инерциальных системах отсчета различна.

Лоренцево сокращение длины — эффект *кинематический и взаимный*: если в системах K и K' есть два одинаковых стержня, то с точки зрения каждой из них короче тот стержень, который движется относительно нее.

ДЛИТЕЛЬНОСТЬ СОБЫТИЙ В РАЗНЫХ СИСТЕМАХ ОТСЧЕТА. Если в системе отсчета K интервал времени между двумя событиями, происходящими в одной и той же точке, равен τ_0 , то интервал времени между этими событиями в системе K' (она движется относительно системы K со скоростью v)

$$\tau = \tau_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \text{ — так называемое релятивистское замедление}$$

времени.

Таким образом, длительность события, происходящего в некоторой точке, *наименьшая в той инерциальной системе отсчета, относительно которой эта система неподвижна*. Следовательно, часы, движущиеся относительно инерциальной системы отсчета, идут медленнее покоящихся часов. Этот эффект *кинематический и взаимный*: если с точки зрения K -системы медленнее идут часы K' -системы, то с точки зрения K' -системы, наоборот, медленнее идут часы K -системы (причем в том же отношении).

ЗАКОН ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ. Ньютон, изучая движение небесных тел, на основании законов Кеплера и основных законов динамики открыл всеобщий закон **всемирного тяготения**: между любыми двумя материальными точками действует сила взаимного притяжения, прямо пропорциональная произведению масс этих точек (m_1 и m_2) и обратно пропорциональная квадрату расстояния между ними (r^2):

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}.$$

Закон всемирного тяготения установлен для тел, принимаемых за материальные точки, т. е. для таких тел, размеры которых малы по сравнению с расстоянием между ними. Сила F называется **гравитационной** (или **силой всемирного тяготения**). Силы тяготения всегда являются силами притяжения и направлены вдоль прямой, проходящей через центры взаимодействующих тел. Коэффициент пропорциональности G называется **гравитационной постоянной**:

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

Впервые экспериментальное доказательство закона всемирного тяготения для земных тел, а также числовое определение гравитационной постоянной G проведено английским физиком Г. Кавендишем. Принципиальная схема опыта Кавендиша, применившего **крутильные весы**, представлена на рис. 7. Легкое коромысло A с двумя одинаковыми шариками массой $m = 729$ г подвешено на упругой нити B . На коромысле C укреплены на той же высоте массивные шары массой $M = 158$ кг. Поворачивая коромысло C вокруг вертикальной оси, можно изменять расстояние между шарами с массами m и M . Под действием пары сил, приложенных к шарам m со стороны шаров M , коромысло A поворачивается в горизонтальной плоскости, закручивая нить B до тех пор, пока момент сил упругости не уравнивает момента сил тяготения. Зная упругие свойства нити, по измеренному углу поворота можно найти возникающие силы притяжения, а так как массы шаров известны, то можно вычислить значение G .

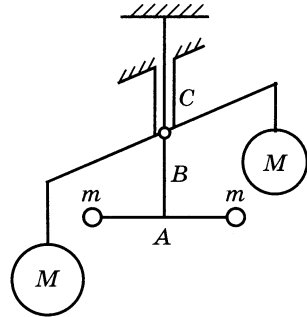


Рис. 7

ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА. Рассмотрим механическую систему, состоящую из n тел, масса и скорость которых соответственно равны m_1, m_2, \dots, m_n и $\vec{v}_1, \vec{v}_2, \dots, \vec{v}_n$. Пусть $\vec{f}_1, \vec{f}_2, \dots, \vec{f}_n$ — равнодействующие внутренних сил, действующих на каждое из этих тел, а $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \dots, \vec{F}_n$ —

равнодействующие внешних сил. Запишем второй закон Ньютона для каждого из n тел механической системы:

$$\frac{d}{dt}(m_1\vec{v}_1) = \vec{f}_1 + \vec{F}_1,$$

$$\frac{d}{dt}(m_2\vec{v}_2) = \vec{f}_2 + \vec{F}_2,$$

.....

$$\frac{d}{dt}(m_n\vec{v}_n) = \vec{f}_n + \vec{F}_n.$$

Складывая почленно эти уравнения, получаем

$$\frac{d}{dt}(m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 + \dots + m_n\vec{v}_n) = \vec{f}_1 + \vec{f}_2 + \dots + \vec{f}_n + \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n.$$

Так как геометрическая сумма внутренних сил механической системы по третьему закону Ньютона равна нулю, то

$$\frac{d}{dt}(m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 + \dots + m_n\vec{v}_n) = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n,$$

или

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n,$$

где $\vec{p} = \sum_{i=1}^n m_i\vec{v}_i$ — импульс системы.

В случае отсутствия внешних сил (замкнутая система)

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \sum_{i=1}^n \frac{d}{dt}(m_i\vec{v}_i) = 0, \text{ т. е. } \vec{p} = \sum_{i=1}^n m_i\vec{v}_i = \text{const.}$$

Последнее выражение и является **законом сохранения импульса**: *импульс замкнутой системы сохраняется, т. е. не изменяется с течением времени, или, иначе говоря, в замкнутой системе тел геометрическая сумма импульсов тел остается постоянной при любых взаимодействиях тел этой системы между собой.*

Закон сохранения импульса справедлив не только в классической физике, хотя он и получен как следствие законов Нью-

тона. Эксперименты доказывают, что он выполняется и для замкнутых систем микрочастиц (они подчиняются законам квантовой механики). Этот закон носит универсальный характер, т. е. закон сохранения импульса — *фундаментальный закон природы*.

ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ МОМЕНТА ИМПУЛЬСА — момент импульса замкнутой системы сохраняется (т. е. не изменяется с течением времени).

ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ПОЛНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ: *полная механическая энергия замкнутой системы тел, взаимодействующих посредством сил тяготения или сил упругости, остается постоянной при любых движениях тел системы.*

Рассмотрим взаимопревращение кинетической и потенциальной энергии в замкнутой системе. Если тела замкнутой системы взаимодействуют друг с другом посредством сил тяжести или сил упругости, то

$$A = -(E_{п2} - E_{п1}) \text{ и } A = E_{к2} - E_{к1},$$

откуда

$$E_{к2} - E_{к1} = -(E_{п2} - E_{п1}),$$

где $E_{к1}$, $E_{к2}$, $E_{п1}$, $E_{п2}$ — соответственно общая кинетическая энергия системы тел в два разных момента времени и потенциальная энергия системы тел в те же два разных момента времени. Следовательно,

$$E_{к1} + E_{п1} = E_{к1} + E_{п2} —$$

закон сохранения полной механической энергии.

Более общая формулировка закона сохранения полной механической энергии: в системе тел, между которыми действуют только консервативные силы, полная механическая энергия сохраняется, т. е. не изменяется со временем:

$$E = E_{к} + E_{п} = \text{const},$$

или, другими словами, в консервативных системах *полная механическая энергия сохраняется.*

В консервативных системах могут происходить лишь превращения кинетической энергии в потенциальную и обратно в

эквивалентных количествах так, что полная энергия остается неизменной. Этот закон не есть просто закон *количественного* сохранения энергии, а **закон сохранения и превращения энергии**, выражающий и *качественную* сторону взаимного превращения различных форм движения друг в друга. Закон сохранения и превращения энергии — *фундаментальный закон природы*.

ЗАМКНУТАЯ (ИЗОЛИРОВАННАЯ) СИСТЕМА — механическая система тел, на которую не действуют внешние силы.

ИМПУЛЬС (КОЛИЧЕСТВО ДВИЖЕНИЯ) материальной точки (тела) — векторная величина, численно равная произведению массы материальной точки (тела) на ее скорость и имеющая направление скорости:

$$\vec{p} = m\vec{v}.$$

Единица импульса — **килограмм-метр в секунду** ($\text{кг} \cdot \text{м}/\text{с}$): $1 \text{ кг} \cdot \text{м}/\text{с}$ равен импульсу материальной точки массой 1 кг , движущейся со скоростью $1 \text{ м}/\text{с}$.

ИНЕРТНОСТЬ — свойство тела оказывать сопротивление изменению его скорости (как по модулю, так и по направлению). Инертность присуща всем телам, но в разной степени. Из двух взаимодействующих тел более инертно то, которое медленнее изменяет свою скорость. Мерой инертности тела в поступательном движении является его **м а с с а**.

ИНЕРЦИАЛЬНАЯ СИСТЕМА ОТСЧЕТА — система отсчета, относительно которой материальная точка, свободная от внешних воздействий, либо покоится, либо движется равномерно и прямолинейно.

Механическое движение относительно, и его характер зависит от выбора системы отсчета. Первый закон Ньютона выполняется не во всех системах отсчета, а только в инерциальных.

Опытным путем установлено, что инерциальной можно считать **гелиоцентрическую (звездную) систему отсчета** (начало координат находится в центре Солнца, а оси проведены в направлении трех далеких звезд). Система отсчета, связанная с Землей, строго говоря, **н е и н е р ц и а л ь н а**, однако эффекты, обусловленные ее неинерциальностью (Земля вращается

вокруг собственной оси и вокруг Солнца), незначительны. При решении многих задач ими можно пренебречь.

КЕПЛЕРА ЗАКОНЫ — законы движения планет вокруг Солнца.

Первый закон. Каждая планета движется по эллипсу, в одном из фокусов которого находится Солнце.

Второй закон. Радиус-вектор, проведенный из центра Солнца в центр планеты, за равные промежутки времени описывает одинаковые площади.

Третий закон. Квадраты периодов обращения планет вокруг Солнца относятся как кубы больших полуосей их орбит.

КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ механической системы — энергия механического движения этой системы.

Кинетическая энергия тела массой m , движущегося со скоростью v , определяется работой, которую надо совершить, чтобы сообщить телу данную скорость:

$$E_{\text{к}} = \frac{mv^2}{2}.$$

Поскольку кинетическая энергия системы зависит от скоростей ее тел, а скорости зависят от выбора системы отсчета, то в разных инерциальных системах отсчета, движущихся друг относительно друга, скорость тела, а следовательно, и его кинетическая энергия будут неодинаковы. Кинетическая энергия всегда *положительна*.

КОСМИЧЕСКИЕ СКОРОСТИ

Первая космическая скорость v_1 — минимальная скорость, которую надо сообщить телу, чтобы оно могло двигаться вокруг Земли по круговой орбите, т. е. стало искусственным спутником Земли. На спутник, движущийся по круговой орбите радиусом r , действует сила тяготения Земли, сообщающая ему нормальное ускорение v_1^2/r . По второму закону Ньютона

$$\frac{GmM}{r^2} = \frac{mv_1^2}{r},$$

где G — гравитационная постоянная, а M — масса Земли.

Если спутник движется вблизи поверхности Земли, то $r \approx R_0$ (радиус Земли) и $g = GM/R_0^2$, поэтому у поверхности Земли

$$v_1 = \sqrt{gR_0} = 7,9 \text{ км/с.}$$

Вторая космическая (или параболическая) скорость — наименьшая скорость, которую надо сообщить телу, чтобы оно могло преодолеть притяжение Земли и превратиться в спутник Солнца, т. е. чтобы его орбита в поле тяготения Земли стала параболической.

Третья космическая скорость — скорость, которую необходимо сообщить телу на Земле, чтобы оно покинуло пределы Солнечной системы, преодолев притяжение Солнца. Третья космическая скорость $v_3 = 16,7 \text{ км/с}$.

ЛАМИНАРНОЕ ТЕЧЕНИЕ — такое движение жидкости, при котором каждый выделенный вдоль потока тонкий слой скользит относительно соседних, не перемешиваясь с ними. Ламинарное течение называется также *слоистым*. Ламинарное течение жидкости наблюдается при небольших скоростях ее движения. Внешний слой жидкости, примыкающий к поверхности трубы, в которой она течет, из-за сил молекулярного сцепления прилипает к ней и остается неподвижным. Скорости последующих слоев тем больше, чем больше их расстояние до поверхности трубы, и наибольшей скоростью обладает слой, движущийся вдоль оси трубы.

ЛОРЕНЦА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ. Анализ явлений в инерциальных системах отсчета, проведенный А. Эйнштейном на основе сформулированных им постулатов, показал, что классические преобразования Галилея несовместимы с ними и, следовательно, должны быть заменены преобразованиями, удовлетворяющими постулатам теории относительности.

Рассмотрим две инерциальные системы отсчета: K (с координатами x, y, z) и K' (с координатами x', y', z'), движущуюся относительно K (вдоль оси X) со скоростью $\vec{v} = \text{const}$ (рис. 8). Переход от одной инерциальной системы к другой осуществля-

ются посредством **преобразований Лоренца**:

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

$$y' = y,$$

$$z' = z,$$

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

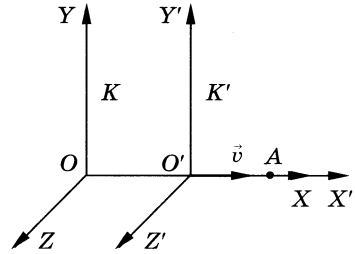


Рис. 8

Из преобразований Лоренца вытекает, что при малых скоростях (по сравнению со скоростью c) они переходят в классические преобразования Галилея, которые являются, следовательно, *предельным случаем преобразований Лоренца*. При $v > c$ выражения для x , t , x' , t' теряют физический смысл (становятся мнимыми). Это соответствует постулату Эйнштейна, что движение со скоростью, большей скорости распространения света в вакууме, невозможно.

Из преобразований Лоренца следует важный вывод, что *расстояние и промежуток времени между двумя событиями меняются при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой*, в то время как в рамках преобразований Галилея эти величины считались абсолютными, не изменяющимися при переходе от системы к системе. Кроме того, пространственные и временные преобразования не являются независимыми, поскольку в закон преобразования координат входит время, а в закон преобразования времени — пространственные координаты, т. е. устанавливается взаимосвязь пространства и времени.

МАССА ТЕЛА — физическая величина, являющаяся мерой его инерционных (*инертная масса*) и гравитационных (*гравитационная масса*) свойств. В настоящее время можно считать доказанным, что инертная и гравитационная массы равны друг другу (с точностью, не меньшей 10^{-12} их значения). Поэтому, рассматривая массу, не уточняют, какая из них имеется в виду, а просто говорят о массе тела.

Единица массы — **килограмм (кг)** (*основная единица*) (см. Единицы физических величин).

МЕХАНИКА, СТРУКТУРА. Механика — часть физики, в которой изучаются закономерности механического движения и причины, вызывающие или изменяющие это движение.

Механика делится на: 1) **классическую (механика Галилея—Ньютона)**: в ней изучаются законы движения макроскопических тел, скорости которых малы по сравнению со скоростью света в вакууме; 2) **релятивистскую** (основана на специальной теории относительности): в ней рассматриваются законы движения макроскопических тел со скоростями, сравнимыми со скоростью света в вакууме; 3) **квантовую (волновая механика)**: в ней описываются законы движения микроскопических тел (отдельных атомов и элементарных частиц).

Классическую механику составляют кинематика, динамика и статика.

Кинематика описывает движение тел, не рассматривая причины, которые это движение обуславливают.

Динамика изучает законы движения тел и причины, которые вызывают или изменяют это движение.

Статика рассматривает условия равновесия системы тел. Если известны законы движения тел, то из них можно установить и условия равновесия.

МЕХАНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА — совокупность материальных точек (тел), рассматриваемых как единое целое.

МЕХАНИЧЕСКОЕ ДВИЖЕНИЕ — изменение положения тела (или его частей) в пространстве с течением времени относительно других тел.

МОМЕНТ ИМПУЛЬСА (МОМЕНТ КОЛИЧЕСТВА ДВИЖЕНИЯ) материальной точки массой m относительно неподвижной точки O — физическая величина, равная произведению расстояния от материальной точки до точки O и перпендикулярной составляющей импульса (рис. 9). Момент импульса обозначается через L :

$$L = rp_{\perp} = rmv_{\perp} = rmv \sin \alpha,$$

где α — угол между направлением скорости и линией, соединяющей материальную точку массой m с точкой O .

Момент импульса — *вектор*. Если материальная точка движется по круговой траектории вокруг точки O , то направление вектора \vec{L} определяется по **правилу правого винта**: если винт вращать в направлении движения материальной точки, то его поступательное движение совпадет с направлением вектора момента импульса (рис. 10).

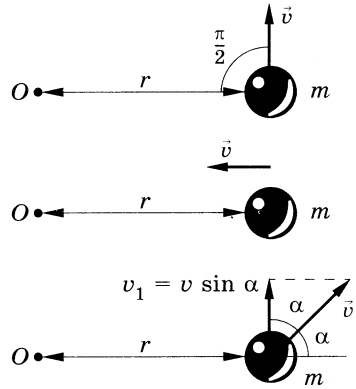


Рис. 9

Момент импульса твердого тела относительно оси Z есть сумма моментов импульсов отдельных частиц относительно той же оси:

$$L = \sum_{i=1}^n m_i v_i r_i,$$

где r_i — расстояние от оси Z до отдельной частицы тела, $m_i v_i$ — импульс этой частицы.

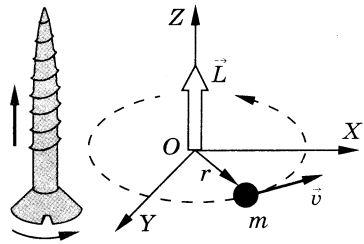


Рис. 10

Момент силы относительно неподвижной точки O

$$M = Fr \sin \alpha = Fl,$$

где α — угол между радиусом-вектором \vec{r} и силой F ; $r \sin \alpha = l$ — кратчайшее расстояние между линией действия силы и точкой O — **плечо силы**.

МОЩНОСТЬ — физическая величина, характеризующая скорость совершения работы.

Средняя мощность за промежуток времени Δt — физическая величина, определяемая отношением работы силы к этому промежутку времени:

$$\langle N \rangle = \frac{\Delta A}{\Delta t}.$$

Мгновенная мощность — физическая величина, определяемая первой производной работы по времени:

$$N = \frac{dA}{dt}.$$

За время dt сила \vec{F} совершает работу $\vec{F}d\vec{r}$, и мощность, развиваемая этой силой, в данный момент времени

$$N = \frac{F d\vec{r}}{dt} = \vec{F}\vec{v},$$

т. е. равна скалярному произведению вектора силы на вектор скорости, с которой движется точка приложения этой силы. *Мощность — величина скалярная.*

Единица мощности — ватт (Вт): 1 Вт — мощность, при которой за время 1 с совершается работа 1 Дж (1 Вт = 1 Дж/с).

НЕИНЕРЦИАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОТСЧЕТА — системы отсчета, движущиеся относительно инерциальной системы отсчета с ускорением.

НЬЮТОНА ЗАКОНЫ

Первый закон Ньютона (закон инерции): *м а т е р и а л ь н а я т о ч к а (тело) сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения до тех пор, пока воздействие со стороны других тел не выведет ее (его) из этого состояния.*

Или

существуют такие системы отсчета, относительно которых поступательно движущиеся тела сохраняют свою скорость постоянной, если на них не действуют другие тела.

Первый закон Ньютона утверждает существование инерциальных систем отсчета.

Второй закон Ньютона: *у с к о р е н и е, приобретаемое м а т е р и а л ь н о й т о ч к о й (телом), пропорционально вызывающей его силе, совпадает с ней по направлению и обратно пропорционально массе материальной точки (тела):*

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}, \text{ или } \vec{F} = m\vec{a} = m \frac{d\vec{v}}{dt}.$$

Более общая формулировка закона: *скорость изменения импульса материальной точки (тела) равна действующей на нее (него) силе:*

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

Третий закон Ньютона: *всякое действие материальной точки (тел) друг на друга имеет характер взаимодействия; силы, с которыми действуют друг на друга материальные точки, всегда равны по модулю, противоположно направлены и действуют вдоль прямой, соединяющей эти точки:*

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

где \vec{F}_{12} — сила, действующая на первую материальную точку со стороны второй, \vec{F}_{21} — сила, действующая на вторую материальную точку со стороны первой. Эти силы приложены к разным материальным точкам (телам), всегда действуют парами и являются силами одной природы.

Третий закон Ньютона позволяет осуществить переход от динамики отдельной материальной точки к динамике системы материальных точек, для которой взаимодействие сводится к силам парного взаимодействия между отдельными материальными точками.

Законы Ньютона сформулированы в 1687 г., играют исключительную роль в механике и являются (как и все физические законы) обобщением результатов огромного человеческого опыта. Их рассматривают как систему взаимосвязанных законов и опытной проверке подвергают не каждый отдельный закон, а всю систему в целом.

ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ ОДНОВРЕМЕННОСТИ. Пусть в системе K в точках с координатами x_1 и x_2 в моменты времени t_1 и t_2 происходят два события. В системе K' , движущейся относительно системы K со скоростью \vec{v} , им соответствуют координаты x'_1 и x'_2 и моменты времени t'_1 и t'_2 . Если события в системе K происходят в одной точке ($x_1 = x_2$) и являются одновременными ($t_1 = t_2$), то, согласно преобразованиям Лоренца,

$$x'_1 = x'_2, \quad t'_1 = t'_2,$$

т. е. эти события являются одновременными и пространственно совпадающими для любой инерциальной системы отсчета.

Если события в системе K пространственно разобцены ($x_1 \neq x_2$), но одновременны ($t_1 = t_2$), то в системе K' , согласно преобразованиям Лоренца,

$$x'_1 = \frac{x_1 - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad x'_2 = \frac{x_2 - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}},$$

$$t'_1 = \frac{1 - vx_1/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad t'_2 = \frac{t - vx_2/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}},$$

$$x'_1 \neq x'_2, \quad t'_1 \neq t'_2.$$

Таким образом, в системе K' эти события, оставаясь пространственно разобцеными, оказываются и неодновременными.

ПАСКАЛЯ ЗАКОН — основной закон гидростатики, описывающий давление при равновесии жидкостей (газов): *давление в любом месте покоящейся жидкости одинаково по всем направлениям, причем давление одинаково передается по всему объему, занятому покоящейся жидкостью*. На законе Паскаля основано, например, действие гидравлических прессов, подъемников, жидкостных манометров.

ПЛОТНОСТЬ ВЕЩЕСТВА — физическая величина, определяемая массой единицы объема вещества:

$$\rho = \frac{m}{V}.$$

Единица плотности — килограмм на кубический метр (кг/м^3): 1 кг/м^3 равен плотности однородного вещества, масса которого при объеме 1 м^3 равна 1 кг .

ПОЛНАЯ МЕХАНИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ — энергия механического движения и взаимодействия

$$E = E_{\text{к}} + E_{\text{п}},$$

равная сумме кинетической и потенциальной энергий.

Потенциальная энергия — механическая энергия системы тел, определяемая их взаимным расположением и характером сил взаимодействия между ними.

Потенциальная энергия определяется с точностью до некоторой произвольной постоянной. Это не отражается на физических законах, так как в них входит или разность потенциальных энергий в двух положениях тела, или производная $E_{\text{п}}$ по координатам. Поэтому потенциальную энергию тела в каком-то определенном положении считают равной нулю (выбирают нулевой уровень отсчета), а энергию тела в других положениях отсчитывают относительно нулевого уровня. Так как начало отсчета выбирается произвольно, то потенциальная энергия, в отличие от кинетической, может иметь отрицательное значение.

Пусть взаимодействие тел осуществляется посредством силовых полей.

Поле, в котором работа, совершаемая действующими силами при перемещении тела из одного положения в другое, не зависит от того, по какой траектории это перемещение произошло, а зависит только от начального и конечного положений тела, называется **потенциальным**. Потенциальными являются, например, поле упругих сил, поле гравитационных сил.

Консервативная сила — сила, работа которой при перемещении точки (тела) зависит только от начального и конечного положений точки (тела) в пространстве (на рис. 11 точки A и B соответственно).

Тело, находясь в потенциальном поле сил, обладает потенциальной энергией $E_{\text{п}}$. Работа консервативных сил при элементарном (бесконечно малом) изменении конфигурации системы равна приращению потенциальной энергии, взятому со знаком минус, так как работа совершается за счет убыли потенциальной энергии:

$$\Delta A = -\Delta E_{\text{п}}.$$

Конкретный вид функции $E_{\text{п}}$ зависит от характера силового

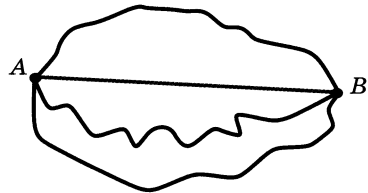


Рис. 11

поля. В качестве примеров рассмотрим потенциальную энергию тела в поле гравитационных и упругих сил.

1. *Потенциальная энергия тела массой m , поднятого на высоту h над поверхностью Земли,*

$$E_{\text{п}} = mgh,$$

где h отсчитывается от нулевого уровня, для которого $E_{\text{п}} = 0$. Это выражение вытекает непосредственно из того, что потенциальная энергия равна работе силы тяжести при падении тела с высоты h на поверхность Земли.

2. *Потенциальная энергия упругодеформированного тела*

$$E_{\text{п}} = \frac{kx^2}{2},$$

т. е. равна работе силы упругости при переходе упругодеформированного тела в положение, в котором его деформация равна нулю.

ПРИНЦИП НЕЗАВИСИМОСТИ ДЕЙСТВИЯ СИЛ: если на материальную точку действует одновременно несколько сил, то каждая из этих сил сообщает материальной точке ускорение согласно второму закону Ньютона, как будто другие силы отсутствуют. Силы и ускорения можно разлагать на составляющие, использование которых приводит к существенному упрощению решения задач. На рис. 12, например, действующая сила $\vec{F} = m\vec{a}$ разложена на два компонента: **тангенциальную силу \vec{F}_{τ}** (направлена по касательной к траектории) и **нормальную силу \vec{F}_n** (направлена по нормали к центру кривизны). Используя выражения $a_{\tau} = \frac{dv}{dt}$ и $a_n = \frac{v^2}{R}$, можно записать:

$$F_{\tau} = ma_{\tau} = m \frac{dv}{dt};$$

$$F_n = ma_n = \frac{mv^2}{R}.$$

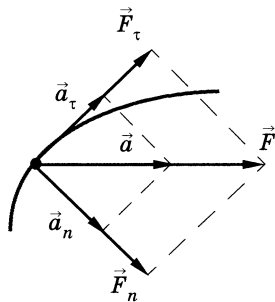


Рис. 12

Если на материальную точку действует одновременно несколько сил, то, согласно принципу независимости действия сил, под силой \vec{F} во втором законе Ньютона понимают *результирующую силу*.

РАБОТА СИЛЫ — количественная характеристика процесса обмена энергией между взаимодействующими телами.

Если тело движется *прямолинейно* и на него действует постоянная сила \vec{F} , которая составляет некоторый угол α с направлением перемещения, то работа этой силы равна произведению проекции силы F_s на направление перемещения ($F_s = F \cos \alpha$), умноженной на перемещение точки приложения силы:

$$A = F_s s = F s \cos \alpha. \quad (1)$$

Из формулы (1) следует, что при $\alpha < \pi/2$ работа силы положительна, в этом случае составляющая F_s совпадает по направлению с вектором скорости движения \vec{v} . Если $\alpha > \pi/2$, то работа силы отрицательна. При $\alpha = \pi/2$ (сила направлена перпендикулярно перемещению) работа силы равна нулю.

В общем случае сила может изменяться как по модулю, так и по направлению, поэтому формулой (1) пользоваться нельзя. Если, однако, рассмотреть элементарное перемещение $d\vec{r}$, то силу \vec{F} можно считать постоянной, а движение точки ее приложения — прямолинейным. **Элементарная работа** силы \vec{F} на перемещении $d\vec{r}$

$$dA = \vec{F} d\vec{r} = F \cos \alpha ds = F_s ds,$$

где α — угол между векторами \vec{F} и $d\vec{r}$; $ds = |d\vec{r}|$ — элементарный путь; F_s — проекция вектора \vec{F} на вектор $d\vec{r}$ (рис. 13). Работа — *скалярная* величина.

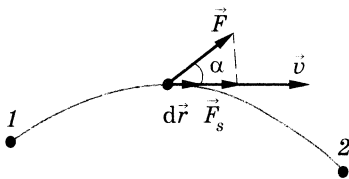


Рис. 13

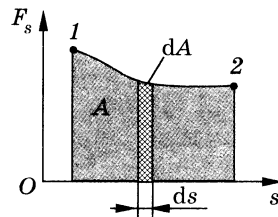


Рис. 14

Работа, совершаемая переменной силой F_s на пути s вдоль траектории 1—2, численно равна площади закрашенной на рис. 14 фигуры.

Единица работы — джоуль (Дж): 1 Дж — работа, совершаемая силой 1 Н на пути 1 м (1 Дж = 1 Н · м).

РАБОТА СИЛЫ ТЯЖЕСТИ. Работа силы тяжести при свободном падении тела с высоты h_1 (начало отсчета) до высоты h_2 (рис. 15)

$$A = mg(h_1 - h_2),$$

где m — масса тела, g — ускорение свободного падения. Работа силы тяжести зависит только от начального и конечного положений тела (т. е. поле тяготения потенциально) и вдоль замкнутой траектории равна нулю.

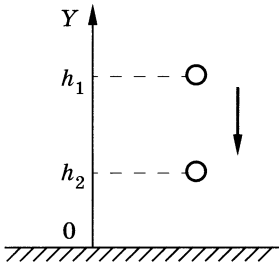


Рис. 15

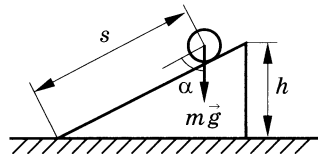


Рис. 16

Если тело падает с высоты h до нулевого уровня, то работа силы тяжести

$$A = mgh,$$

если же оно брошено по вертикали вверх на высоту h с нулевого уровня, то

$$A = -mgh.$$

Если тело движется по наклонной плоскости (рис. 16), то работа силы тяжести $A = mgs \cos \alpha$, где $s \cos \alpha = h$, поэтому

$$A = mgh.$$

РАБОТА СИЛЫ УПРУГОСТИ. В качестве примера рассмотрим работу силы упругости *пружины* (рис. 17). Работа силы упругости пружины

$$A = \frac{kx_1^2}{2} - \frac{kx_2^2}{2},$$

где k — жесткость пружины, x_1 и x_2 — соответственно координаты начального и конечного положений пружины. Эта формула справедлива и для других деформированных тел. Работа силы упругости определяется только начальной и конечной координатой, т. е. поле упругих сил потенциально.

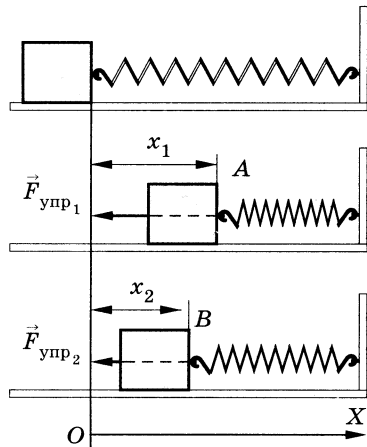


Рис. 17

РАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ — движение, при котором материальная точка за любые равные промежутки времени совершает равные перемещения.

РАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ ПО ОКРУЖНОСТИ — движение, при котором материальная точка (тело) за равные промежутки времени проходит равные по длине дуги окружности. Это движение — *частный случай криволинейного движения*. В любой точке траектории скорость \vec{v} направлена по касательной к окружности, а модуль скорости точки с течением времени не изменяется: $v = \text{const}$ (рис. 18).

Тангенциальная составляющая ускорения при равномерном движении точки по окружности

$$a_\tau = 0,$$

а нормальная составляющая ускорения

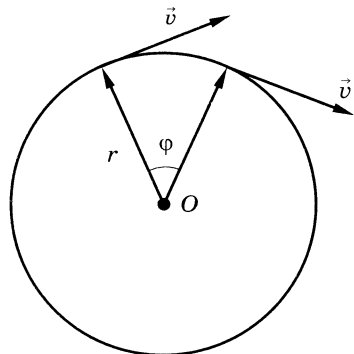


Рис. 18

(центростремительное ускорение)

$$a_n = \frac{v^2}{r}$$

направлена по радиусу к центру окружности. Вектор нормального ускорения в любой точке окружности *перпендикулярен* вектору скорости (рис. 19). Ускорение материальной точки, равномерно движущейся по окружности, всегда *центростремительное*.

Период вращения T — время, за которое точка совершает один полный оборот по окружности, т. е. поворачивается на угол 2π .

Частота вращения — число полных оборотов, совершаемых точкой при равномерном ее движении по окружности, в единицу времени:

$$n = \frac{1}{T}.$$

Единица частоты — секунда в минус 1-й степени (с^{-1}): 1 с^{-1} равна частоте вращения, при которой материальная точка, равномерно вращаясь, за время 1 с совершает 1 оборот.

Поскольку за время, равное периоду T , точка проходит путь, равный длине окружности $2\pi r$, то

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

Подставив это выражение в формулу для a_n , получим

$$a_n = \frac{4\pi^2 r}{T^2} = 4\pi^2 n^2 r.$$

РАВНОМЕРНОЕ ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ ДВИЖЕНИЕ — движение с постоянной по модулю ($v = \text{const}$) и по направлению ($\vec{v} = \text{const}$) скоростью.

Скорость равномерного прямолинейного движения

$$\vec{v} = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}$$

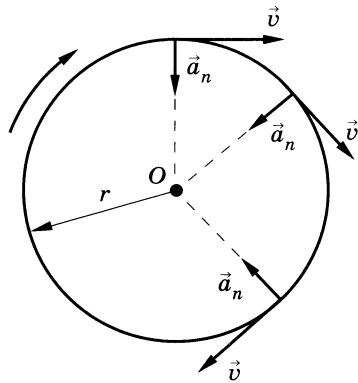


Рис. 19

совпадает по направлению с вектором перемещения и в каждой точке траектории направлена вдоль траектории (при прямолинейном движении вектор перемещения совпадает с соответствующим участком траектории).

График скорости $v = v(t)$ при равномерном движении задается прямой линией, параллельной оси времени (рис. 20, а).

Предположим, что материальная точка движется равномерно вдоль оси OX . Проекция перемещения на ось в данном случае равна:

$$x - x_0 = v_x t,$$

и кинематическое уравнение равномерного движения материальной точки вдоль оси X имеет вид:

$$x = x_0 + v_x t,$$

где x , x_0 — соответственно координаты точки в данный (t) и начальный ($t = 0$) моменты времени, v_x — проекция вектора скорости \vec{v} на ось OX . Графики зависимости координат точки от времени для двух случаев ($x_0 = 0, v_x > 0$ и $x_0 \neq 0, v_x > 0$) приведены на рис. 20, б, в.

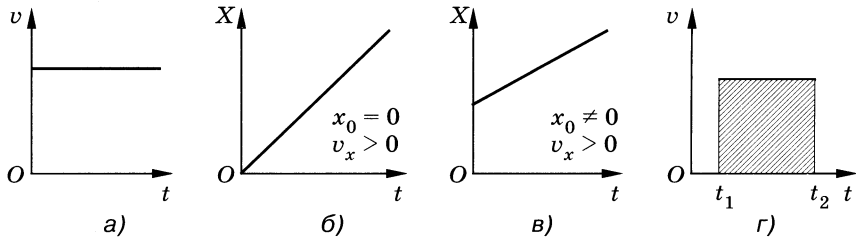


Рис. 20

По графику скорости (рис. 20, г) можно определить пройденный материальной точкой путь за промежуток времени от t_1 до t_2 : он определяется площадью заштрихованного на рисунке прямоугольника.

РАВНОПЕРЕМЕННОЕ ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ ДВИЖЕНИЕ — движение, при котором скорость материальной точки за любые равные промежутки времени изменяется на равные величины, иными словами, движение с постоянным по модулю ($a = \text{const}$) и по

направлению ($\vec{a} = \text{const}$) ускорением. Ускорение \vec{a} направлено вдоль траектории движущейся точки.

Если направление ускорения \vec{a} *совпадает* с направлением скорости \vec{v} точки, то движение **равноускоренное** (в данном случае модуль скорости с течением времени увеличивается), если же направления векторов \vec{a} и \vec{v} *противоположны*, то движение **равнозамедленное** (модуль скорости со временем уменьшается).

За промежуток времени $\Delta t = t - t_0$ скорость изменяется на $\Delta \vec{v} = \vec{v} - \vec{v}_0$ или $\vec{v} - \vec{v}_0 = \vec{a}(t - t_0)$. При $t_0 = 0$

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t$$

или проекция вектора скорости на ось OX :

$$v_x = v_{0x} + a_x t.$$

График зависимости скорости от времени $v_x(t)$ приведен на рис. 21, а.

Путь, пройденный точкой за время t при равноускоренном прямолинейном движении с начальной скоростью \vec{v}_0 и ускорением \vec{a} ,

$$s = v_0 t + \frac{at^2}{2}.$$

При $v_0 = 0$ пройденный путь

$$s = \frac{at^2}{2}.$$

График этой зависимости приведен на рис. 21, б.

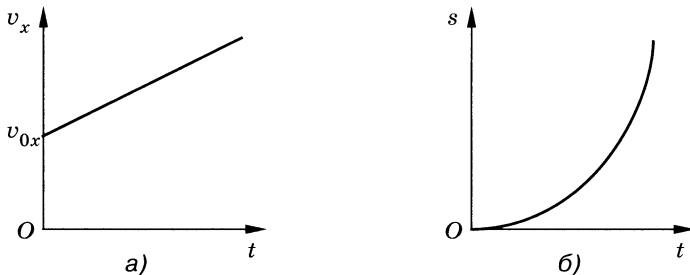
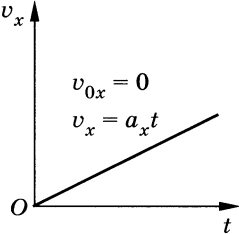
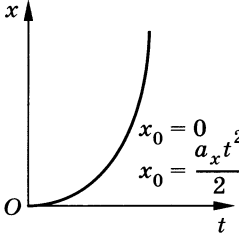
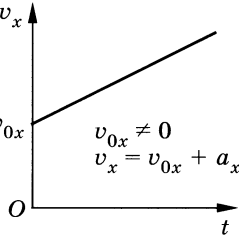
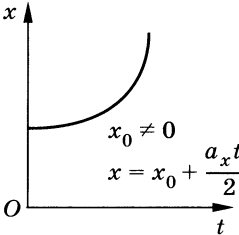
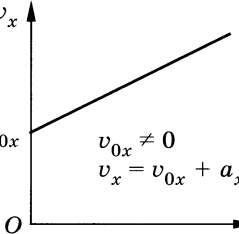
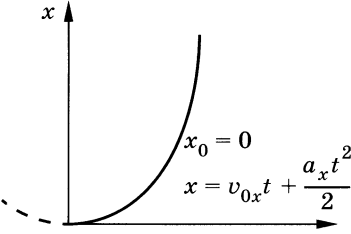
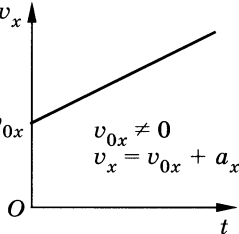
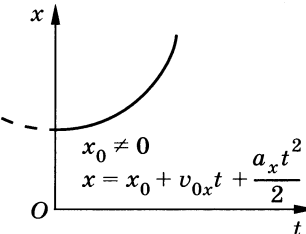


Рис. 21

РАВНОУСКОРЕННОЕ ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ ДВИЖЕНИЕ, ГРАФИКИ

Проекция скорости на ось OX	Координата
$v_x = v_{0x} + a_x t$	$x = x_0 + v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}$
 <p> $v_{0x} = 0$ $v_x = a_x t$ </p>	 <p> $x_0 = 0$ $x = \frac{a_x t^2}{2}$ </p>
 <p> $v_{0x} \neq 0$ $v_x = v_{0x} + a_x t$ </p>	 <p> $x_0 \neq 0$ $x = x_0 + \frac{a_x t^2}{2}$ </p>
 <p> $v_{0x} \neq 0$ $v_x = v_{0x} + a_x t$ </p>	 <p> $x_0 = 0$ $x = v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}$ </p>
 <p> $v_{0x} \neq 0$ $v_x = v_{0x} + a_x t$ </p>	 <p> $x_0 \neq 0$ $x = x_0 + v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}$ </p>

РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ДИНАМИКА — динамика, основанная на постулатах специальной теории относительности: законы природы инвариантны по отношению к преобразованиям Лоренца. В ней рассматриваются взаимодействия тел при скоростях, сравнимых со скоростью света.

Релятивистский импульс рассчитывается по формуле

$$\vec{p} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}},$$

где m — масса частицы.

Основной закон релятивистской динамики:

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \right).$$

Уравнение в таком виде, где справа стоит производная от релятивистского импульса, удовлетворяет первому постулату Эйнштейна.

Полная энергия релятивистской частицы

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (1)$$

различна в разных инерциальных системах отсчета. Уравнение (1) выражает *фундаментальный закон природы* — **закон взаимосвязи массы и энергии**.

Если тело *неподвижно*, то его энергия

$$E_0 = mc^2,$$

где E_0 — **энергия покоя**. В классической механике энергия покоя не учитывается, считается, что при $v = 0$ энергия покоящегося тела равна нулю.

Полная энергия в релятивистской динамике — это сумма кинетической энергии и энергии покоя тела (частицы). Тогда кинетическая энергия

$$E_k = E - E_0 = mc^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1 \right).$$

РЕЛЯТИВИСТСКИЙ ЗАКОН СЛОЖЕНИЯ СКОРОСТЕЙ. Пусть тело движется вдоль оси X' системы K' со скоростью \vec{v}_1 (рис. 22). В свою очередь система K' движется относительно системы K со скоростью \vec{v} . Оси X и X' совпадают, а оси Y и Y' , Z и Z' параллельны. Тогда **релятивистский закон сложения скоростей**:

$$v_2 = \frac{v_1 + v}{1 + v_1 v / c^2},$$

где v_1 — скорость тела относительно системы K' , v_2 — скорость этого же тела относительно системы K . Релятивистский закон сложения скоростей подчиняется второму постулату Эйнштейна.

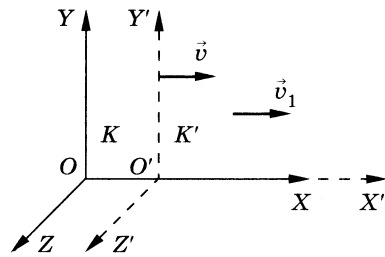


Рис. 22

Если световой импульс в системе K' движется вдоль оси X' со скоростью $\vec{v}_1 = c$, то в системе отсчета K $v_2 = c$. Таким образом, при сложении любых скоростей результат не может превысить скорости света c в вакууме. *Скорость света в вакууме есть предельная скорость.* Если же скорости v и v_1 малы по сравнению со скоростью c ($v \ll c$ и $v_1 \ll c$), то релятивистский закон сложения скоростей в предельном случае для малых скоростей переходит в закон сложения скоростей в классической механике.

СВОБОДНОЕ ПАДЕНИЕ ТЕЛ — движение без начальной скорости, которое совершало бы тело под действием только силы тяжести и без учета сопротивления воздуха. Свободное падение — равноускоренное движение с ускорением свободного падения $g = 9,81 \text{ м/с}^2$, направленным вертикально вниз.

Основные формулы для такого движения:

скорость тела в произвольный момент времени t : $\vec{v} = \vec{g}t$;

путь, пройденный телом в свободном падении: $h = \frac{gt^2}{2}$;

модуль скорости тела при свободном падении с высоты h :

$$v = \sqrt{2gh};$$

время свободного падения с высоты h : $t = \sqrt{2h/g}$.

СИЛА. Для описания воздействий тел друг на друга вводят понятие силы. Под действием сил тела либо изменяют скорость движения, т. е. приобретают ускорения (динамическое проявление сил), либо деформируются, т. е. изменяют свою форму и размеры (статическое проявление сил). В каждый момент времени сила характеризуется числовым значением, направлением в пространстве и точкой приложения. Итак, **сила** — векторная величина, являющаяся мерой механического воздействия на тело со стороны других тел или полей, в результате которого тело приобретает ускорение или изменяет свою форму и размеры.

Единица силы — **ньютон (Н)**: 1 Н равен силе, которая телу массой 1 кг сообщает ускорение 1 м/с^2 в направлении действия силы.

СИЛА НОРМАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ — составляющая силы, действующая со стороны тела на опору и направленная по нормали к поверхности соприкосновения. Естественно, что при скольжении тела по горизонтальной поверхности сила нормального давления равна весу тела. Сила нормального давления по модулю равна силе реакции опоры.

СИЛА РЕАКЦИИ ОПОРЫ — сила \vec{N} , действующая на данное тело со стороны опоры перпендикулярно к его поверхности. Сила реакции опоры по модулю равна силе нормального давления.

СИЛА ТЯЖЕСТИ — сила, которая действует на любое тело, находящееся вблизи земной поверхности, и направлена вертикально вниз:

$$\vec{F}_T = m\vec{g},$$

где m — масса тела, g — ускорение свободного падения. Сила тяжести — одно из проявлений гравитационной силы (силы тяготения), а именно это есть сила притяжения тела к Земле.

Если пренебречь суточным вращением Земли вокруг своей оси, то сила тяжести и сила тяготения равны между собой:

$$F_{\text{т}} = mg = F = \frac{GmM}{R_0^2},$$

где M — масса Земли; R_0 — расстояние между телом и центром Земли. Эта формула дана для случая, когда тело находится на поверхности Земли.

Если тело расположено на высоте h от поверхности Земли, тогда

$$F_{\text{т}} = \frac{GmM}{(R_0 + h)^2},$$

т. е. сила тяжести с удалением от поверхности Земли уменьшается.

СИЛЫ ТРЕНИЯ — силы, возникающие при соприкосновении тел и препятствующие их относительному перемещению. Таким образом, силы трения направлены по касательной к поверхности соприкосновения тел противоположно относительной скорости их перемещения.

Силы трения могут быть разной природы, но в результате их действия механическая энергия всегда превращается во внутреннюю энергию соприкасающихся тел.

Сила, возникающая на границе соприкосновения тел при отсутствии их относительного движения, называется **силой трения покоя**. Сила трения покоя равна по модулю и направлена противоположно силе, приложенной к покоящемуся телу параллельно поверхности соприкасающихся тел.

Относительное движение тел возникает, если внешняя сила $F > (F_{\text{тр0}})_{\text{max}}$, где $(F_{\text{тр0}})_{\text{max}}$ — **максимальная сила трения покоя**:

$$(F_{\text{тр0}})_{\text{max}} = \mu_0 N,$$

где μ_0 — безразмерный коэффициент трения покоя, N — сила нормального давления. Следовательно, максимальная сила трения покоя пропорциональна силе нормального давления.

Если $F > (F_{\text{тр}0})_{\text{max}}$, то тело получает ускорение и начинает скользить по поверхности другого тела. В данном случае также действует сила трения, но уже другая, и она называется **силой трения скольжения**. Направление силы трения скольжения противоположно направлению движения тела, она пропорциональна силе нормального давления (а значит, и силе реакции опоры) (рис. 23):

$$F_{\text{тр}} = \mu N,$$

где μ — безразмерный коэффициент трения скольжения, зависящий от свойств соприкасающихся поверхностей.

Радикальным способом уменьшения силы трения является замена трения скольжения трением качения (шариковые и роликовые подшипники и т. д.). **Сила трения качения** определяется по закону:

$$F_{\text{тр}} = f_{\text{к}} \frac{N}{r},$$

где r — радиус катящегося тела; $f_{\text{к}}$ — коэффициент трения качения, имеющий размерность длины. Таким образом, сила трения качения обратно пропорциональна радиусу катящегося тела.

СИЛА УПРУГОСТИ — сила, возникающая при деформации тела и направленная противоположно направлению смещения частиц тела при деформации.

СИСТЕМА ОТСЧЕТА — совокупность системы координат и синхронизированных между собой часов, связанных с телом отсчета, относительно которого изучается движение тел.

В декартовой системе координат, используемой наиболее часто, положение точки A в данный момент времени по отношению к этой системе характеризуется тремя координатами x , y и z или

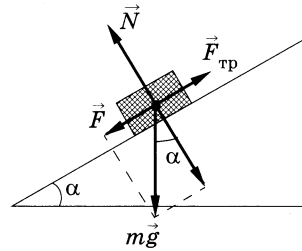


Рис. 23

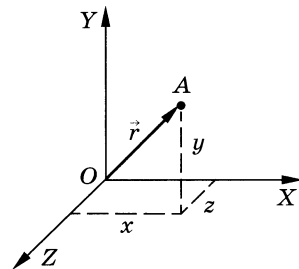


Рис. 24

радиусом-вектором \vec{r} , проведенным из начала системы координат в данную точку (рис. 24).

При движении материальной точки ее координаты с течением времени изменяются. В общем случае ее движение определяется скалярными уравнениями

$$x = x(t), \quad y = y(t), \quad z = z(t), \quad (1)$$

эквивалентными векторному уравнению

$$\vec{r} = \vec{r}(t). \quad (2)$$

Уравнения (1) и соответственно (2) называются **кинематическими уравнениями движения материальной точки**.

СКОРОСТЬ — векторная величина, которая определяет как *быстроту* движения, так и его *направление* в данный момент времени.

Пусть материальная точка движется по какой-либо криволинейной траектории так, что в момент времени t ей соответствует радиус-вектор \vec{r}_0 (рис. 25). В течение малого промежутка времени Δt точка пройдет путь Δs и получит элементарное (бесконечно малое) перемещение $\Delta \vec{r}$.

Средняя скорость — векторная величина, равная отношению приращения $\Delta \vec{r}$ радиуса-вектора точки к промежутку времени Δt :

$$\langle \vec{v} \rangle = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}.$$

Направление вектора средней скорости совпадает с направлением вектора перемещения $\Delta \vec{r}$ (см. рис. 25).

При неограниченном уменьшении Δt средняя скорость стремится к предельному значению, которое называется **мгновенной скоростью** \vec{v} :

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \frac{d\vec{r}}{dt}.$$

Мгновенная скорость — векторная величина, определяемая первой производной радиуса-вектора движущейся точки по времени. Она направлена по касательной к траектории в сторону движения (см. рис. 25).

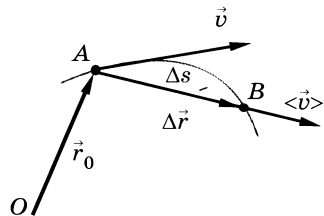


Рис. 25

Единица скорости — метр в секунду (м/с): 1 м/с равен скорости равномерного и прямолинейного движения, при котором точка за 1 с перемещается на расстояние 1 м.

Модуль средней скорости

$$\langle v \rangle = \frac{\Delta s}{\Delta t}; \quad \langle v \rangle = |\langle \vec{v} \rangle| = \frac{|\Delta \vec{r}|}{\Delta t} = \frac{\Delta s}{\Delta t}.$$

Модуль мгновенной скорости

$$v = \frac{ds}{dt}; \quad v = |\vec{v}| = \left| \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} \right| = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{|\Delta \vec{r}|}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt}.$$

Проекции скорости точки на оси координат:

$$v_x = \frac{dx}{dt}; \quad v_y = \frac{dy}{dt}; \quad v_z = \frac{dz}{dt}.$$

В случае движения в одной плоскости, вектор \vec{v} может быть представлен в виде суммы векторов \vec{v}_x и \vec{v}_y , направленных вдоль координатных осей. Из рис. 26 следует, что

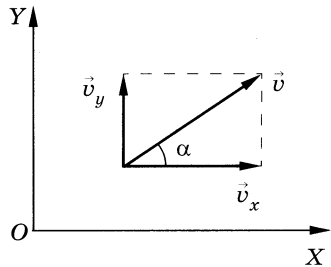


Рис. 26

$$\vec{v} = \vec{v}_x + \vec{v}_y; \quad v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}; \quad v_x = v \cos \alpha; \quad v_y = v \sin \alpha; \quad \operatorname{tg} \alpha = \frac{v_y}{v_x}.$$

СЛЕДСТВИЯ ИЗ УРАВНЕНИЯ БЕРНУЛЛИ

Манометры — приборы для измерения давления жидкостей и газов.

Из уравнения Бернулли для горизонтальной трубки тока

$$\frac{\rho v^2}{2} + p = \text{const}$$

и уравнения неразрывности $Sv = \text{const}$ следует, что при течении жидкости по горизонтальной трубе, имеющей различные сечения, скорость жидкости больше в местах сужения, а статическое давление больше в более широких местах, т. е. там, где скорость меньше. Это можно

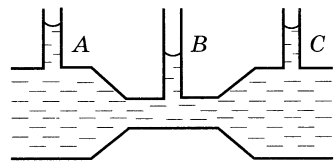


Рис. 27

продемонстрировать, установив вдоль трубы ряд **манометров** (рис. 27). Опыт показывает, что в манометрической трубке *B*, прикрепленной к узкой части трубы, уровень жидкости ниже, чем в манометрических трубках *A* и *C*, прикрепленных к широкой части трубы.

Водоструйный насос. Уменьшение статического давления в точках, где скорость потока больше, положено в основу работы **водоструйного насоса** (рис. 28). Струя воды подается в трубку, открытую в атмосферу, так, что давление на выходе из трубки равно атмосферному. В трубке имеется сужение, в этом месте давление меньше атмосферного. Это давление устанавливается и в откачиваемом сосуде. Воздух из откачиваемого сосуда увлекается вытекающей с большой скоростью водой из узкого конца и удаляется вместе с водой.

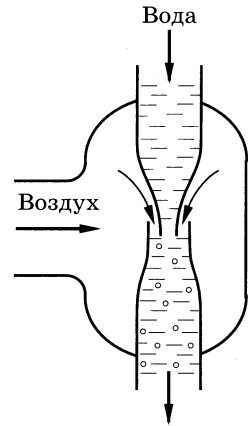


Рис. 28

Измерение скорости потока жидкости (газа)

Трубка Пито — Прандтля (рис. 29) состоит из двух изогнутых под прямым углом трубок, противоположные концы которых присоединены к манометру. С помощью одной из трубок измеряется *полное давление* (p_0), с помощью другой — *статическое* (p). Манометром измеряется разность давлений: $p_0 - p = \rho_0 g h$, где ρ_0 — плотность жидкости в манометре. С дру-

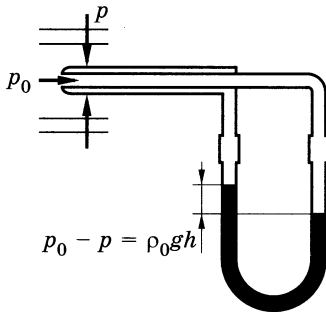


Рис. 29

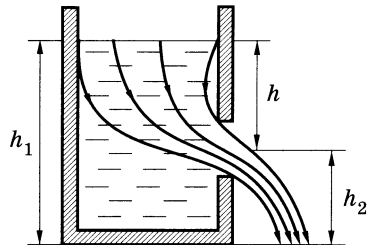


Рис. 30

гой стороны, согласно уравнению Бернулли, разность давлений равна динамическому давлению: $p_0 - p = \rho v^2/2$. Из этих формул искомая скорость жидкости потока $v = \sqrt{2\rho_0gh/\rho}$.

Торричелли формула. Найдем скорость истечения жидкости через малое отверстие в стенке сосуда (рис. 30). Уравнение Бернулли для двух сечений (на уровне h_1 свободной поверхности жидкости в сосуде и на уровне h_2 выхода ее из отверстия):

$$\frac{\rho v_1^2}{2} + \rho gh_1 + p_1 = \frac{\rho v_2^2}{2} + \rho gh_2 + p_2,$$

$p_1 = p_2$ (атмосферное давление).

Тогда

$$\frac{v_1^2}{2} + gh_1 = \frac{v_2^2}{2} + gh_2,$$

$S_1v_1 = S_2v_2$ (уравнение неразрывности). Если $S_1 \gg S_2$, то членом v_1^2 можно пренебречь и $v_2^2 = 2g(h_1 - h_2) = 2gh$, откуда $v_2 = \sqrt{2gh}$ — это и есть **формула Торричелли**.

ТВЕРДОЕ ТЕЛО, ВРАЩАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ — движение, при котором все точки тела движутся по окружностям, центры которых лежат на одной прямой, перпендикулярной к плоскостям окружностей и называемой **осью вращения** (рис. 31).

Различные точки твердого тела движутся по-разному, поэтому его вращательное движение нельзя охарактеризовать движением какой-то одной точки.

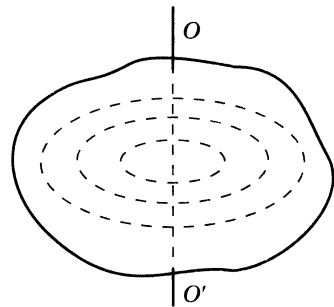


Рис. 31

ТВЕРДОЕ ТЕЛО, ПОСТУПАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ — движение, при котором любая прямая, жестко связанная с движущимся телом, остается параллельной своему первоначальному положению

(рис. 32). Поступательно, например, движется кабина лифта или кабина колеса обозрения.

При поступательном движении *все точки тела движутся одинаково*, и его движение задается и изучается так же, как и движение какой-то произвольной его точки (например, движение центра масс тела).

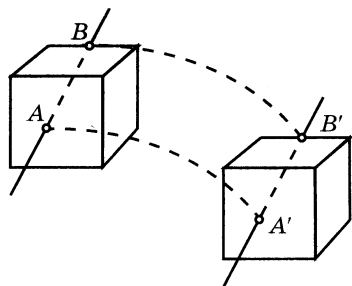


Рис. 32

ТЕЛО ОТСЧЕТА — произвольное тело, условно принимаемое за неподвижное, относительно которого определяется положение других (движущихся) тел. С телом отсчета связывают начало координат системы отсчета. Поскольку положение любого движущегося тела определяется по отношению к телу отсчета, поэтому механическое движение *относительно*.

ТЕОРЕМА О КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ: *работа равнодействующей сил, приложенных к телу, равна изменению кинетической энергии тела:*

$$A = E_{к2} - E_{к1},$$

где $E_{к2}$, $E_{к1}$ — кинетическая энергия тела соответственно в конечном и начальном положениях.

Из теоремы о кинетической энергии следует, что работа любых сил есть мера изменения кинетической энергии тела. Приращение кинетической энергии на элементарном перемещении равно элементарной работе на том же перемещении:

$$\Delta E_{к} = \Delta A,$$

а приращение кинетической энергии на участке траектории 1—2

$$E_{к2} - E_{к1} = A_{12}.$$

Если работа сил на данном участке траектории положительна ($A_{12} > 0$), то кинетическая энергия тела возрастает ($E_{к2} > E_{к1}$), если же работа сил отрицательна ($A_{12} < 0$), то кинетическая энергия тела уменьшается ($E_{к2} < E_{к1}$).

ТРАЕКТОРИЯ — непрерывная линия, описываемая движущейся материальной точкой относительно выбранной системы отсчета. В зависимости от формы траектории различают:

прямолинейное движение — траектория движения в данной системе отсчета — прямая линия;

криволинейное движение — траектория движения в данной системе отсчета — некоторая кривая.

Форма траектории зависит от начальных условий и сил, действующих на материальную точку, а также от того, относительно какой системы отсчета рассматривается движение (*траектории движения одного и того же тела в разных системах отсчета различны*). Так, тело, опущенное с небольшой высоты без начальной скорости, относительно Земли движется прямолинейно; тело же, брошенное горизонтально, будет двигаться по параболе, т. е. криволинейно. С другой стороны, если наблюдать след от капель дождя в покоящемся вагоне, то можно увидеть на стекле прямые линии, а в движущемся вагоне — косые.

ТРЕНИЕ. Различают внешнее (сухое) и внутреннее (жидкое или вязкое) трение. **Внешним трением** называется трение, возникающее в плоскости касания двух соприкасающихся твердых тел при их относительном перемещении. Если соприкасающиеся тела неподвижны друг относительно друга, говорят о **трении покоя**, если же происходит относительное перемещение этих тел, то в зависимости от характера их относительного движения говорят о **трении скольжения, качения или верчения**.

Внутренним трением называется трение между частями одного и того же тела, например между различными слоями жидкости или газа, скорости которых меняются от слоя к слою. В отличие от внешнего трения здесь отсутствует трение покоя. Если тела скользят относительно друг друга и разделены прослойкой вязкой жидкости (смазки), то трение происходит в слое смазки. В таком случае говорят о **гидродинамическом трении** (слой смазки достаточно толстый) и **граничном трении** (толщина смазочной прослойки $\approx 0,1$ мкм и меньше).

Трение играет большую роль в природе и технике. Благодаря трению движется транспорт, удерживается забитый в стену гвоздь и т. д.

В некоторых случаях силы трения оказывают вредное действие и поэтому их надо уменьшать. Для этого на трущиеся поверхности наносят смазку (сила трения уменьшается примерно в 10 раз), которая заполняет неровности между этими поверхностями и располагается тонким слоем между ними так, что поверхности как бы перестают касаться друг друга, а скользят друг относительно друга отдельные слои жидкости. Таким образом, внешнее трение твердых тел заменяется значительно меньшим внутренним трением жидкости.

ТУРБУЛЕНТНОЕ ТЕЧЕНИЕ — такое движение жидкости, при котором вдоль потока происходит интенсивное вихреобразование и перемешивание жидкости (газа). Турбулентное течение называется также вихревым.

При турбулентном течении частицы жидкости приобретают составляющие скоростей, перпендикулярные течению, поэтому они могут переходить из одного слоя в другой. Скорость частиц жидкости быстро возрастает по мере удаления от поверхности трубы, затем изменяется довольно незначительно. Так как частицы жидкости переходят из одного слоя в другой, то их скорости в различных слоях мало отличаются. Из-за большого градиента скоростей у поверхности трубы обычно происходит образование вихрей.

УРАВНЕНИЕ НЕРАЗРЫВНОСТИ. Совокупность частиц движущейся жидкости называется **потоком**. Графически движение жидкостей изображается с помощью **линий тока**, которые проводятся так, что касательные к ним совпадают по направлению с вектором скорости жидкости в соответствующих точках пространства (рис. 33). Линии тока проводятся так, чтобы густота их, характеризуемая отношением числа линий к площади перпендикулярной им площадки, через которую они проходят, была больше там, где больше скорость течения жидкости, и меньше там, где жидкость

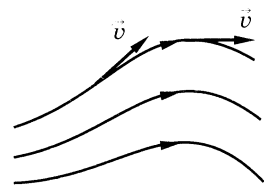


Рис. 33

течет медленнее. Таким образом, по картине линий тока можно судить о направлении и модуле скорости в разных точках пространства, т. е. можно определить состояние движения жидкости. Линии тока в жидкости можно «проявить», например, подмешав в нее какие-либо заметные взвешенные частицы.

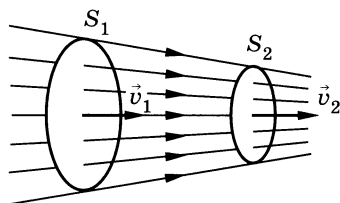


Рис. 34

Часть жидкости, ограниченную линиями тока, называют **трубкой тока**. Течение жидкости называется **установившимся** (или **стационарным**), если форма и расположение линий тока, а также значения скоростей в каждой ее точке со временем не изменяются.

Рассмотрим трубку тока (рис. 34) с двумя сечениями S_1 и S_2 , перпендикулярными скоростям течения жидкости \vec{v}_1 и \vec{v}_2 в месте сечений. За 1 с через сечение S_1 пройдет объем жидкости $S_1 v_1$, через сечение S_2 — $S_2 v_2$. Если жидкость несжимаема ($\rho = \text{const}$), а скорость жидкости в сечении постоянна, то через сечение S_2 пройдет такой же объем жидкости, как и через сечение S_1 , т. е. $S_1 v_1 = S_2 v_2 = \text{const}$.

В общем случае можно записать

$$Sv = \text{const},$$

т. е. *произведение скорости течения несжимаемой жидкости на поперечное сечение трубки тока есть величина постоянная для данной трубки тока*. Это уравнение называется **уравнением неразрывности** для несжимаемой жидкости.

УСКОРЕНИЕ — характеристика неравномерного движения, определяет быстроту изменения скорости по модулю и направлению.

Среднее ускорение неравномерного движения за промежуток времени Δt — векторная величина, равная отношению изменения скорости $\Delta \vec{v}$ к промежутку времени, за который это изменение произошло:

$$\langle \vec{a} \rangle = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}.$$

Мгновенное ускорение — векторная величина, определяемая первой производной скорости по времени:

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \langle \vec{a} \rangle = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{d\vec{v}}{dt}.$$

Единица ускорения — метр на секунду в квадрате (м/с^2): 1 м/с^2 равен ускорению прямолинейного ускоренного движения точки, при котором за 1 с скорость точки изменяется на 1 м/с .

Ускорение при криволинейном движении может быть разложено на две составляющие:

тангенциальную $a_\tau = \frac{dv}{dt}$ — характеризует быстроту изменения скорости *по модулю* (направлена по касательной к траектории, рис. 35);

нормальную $a_n = \frac{v^2}{r}$ — характеризует быстроту изменения скорости *по направлению* (направлена к центру кривизны траектории (см. рис. 35); r — радиус кривизны траектории в данной точке). Из рис. 35 следует, что

$$\vec{a} = \vec{a}_\tau + \vec{a}_n; \quad a = \sqrt{a_\tau^2 + a_n^2}.$$

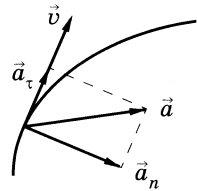


Рис. 35

Классификация движения в зависимости от тангенциальной и нормальной составляющих ускорения

a_τ	a_n	Движение
0	0	Прямолинейное равномерное
$a_\tau = a = \text{const}$	0	Прямолинейное равнопеременное
$a_\tau = f(t)$	0	Прямолинейное с переменным ускорением
0	const	Равномерное по окружности
0	$\neq 0$	Криволинейное равномерное
const	$\neq 0$	Криволинейное равнопеременное
$a_\tau = f(t)$	$\neq 0$	Криволинейное с переменным ускорением

УСКОРЕНИЕ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ — ускорение, приобретаемое материальной точкой под действием сил тяжести.

Согласно фундаментальному физическому закону — **обобщенному закону Галилея**, *все тела в одном и том же поле тяготения падают с одинаковым ускорением*. Следовательно, в данном месте Земли ускорение свободного падения одинаково для всех тел. Оно изменяется вблизи поверхности Земли в зависимости от широты в пределах от $9,780 \text{ м/с}^2$ на экваторе до $9,832 \text{ м/с}^2$ на полюсах. Это обусловлено суточным вращением Земли вокруг своей оси, с одной стороны, и сплюснутостью Земли — с другой (экваториальный и полярный радиусы Земли равны соответственно 6378 и 6357 км). Так как различие значений g невелико, ускорение свободного падения, которое используется при решении практических задач, принимается равным $9,81 \text{ м/с}^2$.

ФИЗИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ — *абстрактные понятия*, которые используются для описания движения тел в зависимости от условий конкретных задач.

Материальная точка — тело, обладающее массой, размерами которого в данной задаче можно пренебречь, что облегчает решение практических задач (например, движущиеся вокруг Солнца планеты при расчетах можно рассматривать как материальные точки).

Абсолютно твердое тело (твердое тело) — тело, которое ни при каких условиях не может деформироваться, и при всех условиях расстояние между двумя точками (или точнее между двумя частицами) этого тела остается постоянным.

Абсолютно упругое тело — тело, деформация которого подчиняется закону Гука, а после прекращения действия внешних сил принимает свои первоначальные размеры и форму.

Абсолютно неупругое тело — тело, полностью сохраняющее деформированное состояние после прекращения действия внешних сил.

ЦЕНТР МАСС (ЦЕНТР ИНЕРЦИИ) — воображаемая точка C , положение которой характеризует распределение масс в теле или

системе материальных точек. В последнем случае радиус-вектор центра масс

$$\vec{r}_C = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \vec{r}_i}{m},$$

где m_i и \vec{r}_i — соответственно масса и радиус-вектор i -й материальной точки, n — число материальных точек в системе,

$$m = \sum_{i=1}^n m_i \text{ — масса системы.}$$

Понятие о центре масс отличается от понятия центра тяжести тем, что центр масс не связан ни с каким силовым полем и имеет смысл для любой механической системы, в то время как центр тяжести имеет смысл для твердого тела, находящегося в однородном поле тяготения.

При движении механической системы *центр масс системы движется как материальная точка, в которой сосредоточена масса всей системы и на которую действует сила, равная геометрической сумме всех внешних сил, приложенных к системе.* Таким образом, центр масс — точка, в которой считается сосредоточенной вся масса тела или системы материальных точек при поступательном движении.

ЦЕНТР ТЯЖЕСТИ — точка, связанная с твердым телом, через которую проходит равнодействующая всех сил тяжести, приложенных к отдельным малым объемам тела при любом его положении в пространстве. Понятие о центре тяжести имеет смысл только для твердого тела, находящегося в однородном поле тяготения, и этим отличается от понятия центра масс, не связанного ни с каким силовым полем и имеющего смысл для любой механической системы. В однородном поле тяготения центр тяжести и центр масс твердого тела совпадают. Центр тяжести может не совпадать ни с одной из точек данного тела (например, у тонкостенного обруча). Если тело подвесить на нити, прикрепленной к различным точкам тела, то направления нитей пересекутся в центре тяжести тела.

ЭНЕРГИЯ — универсальная количественная мера различных форм движения и взаимодействия. С различными формами движения материи связывают различные формы энергии: механическую, тепловую, электромагнитную, ядерную и др. В одних явлениях форма движения материи не изменяется (например, горячее тело нагревает холодное), в других — переходит в иную форму (например, в результате трения механическое движение превращается в тепловое). Однако существенно, что во всех случаях энергия, отданная (в той или иной форме) одним телом другому телу, равна энергии, полученной последним телом.

Единица энергии — джоуль (Дж) (см. Работа силы).

В механике различают кинетическую и потенциальную энергию.

ЭЙНШТЕЙНА ПОСТУЛАТЫ лежат в основе специальной теории относительности (СТО) — физического учения о пространственно-временных закономерностях в связи с законами совершающихся в них физических явлений. СТО применима только к инерциальным системам отсчета.

Первый постулат Эйнштейна (принцип относительности): *все законы природы инвариантны (неизменны) во всех инерциальных системах отсчета.*

Первый постулат Эйнштейна, являясь обобщением механического принципа относительности Галилея на любые физические процессы, утверждает, таким образом, что физические законы инвариантны по отношению к выбору инерциальной системы отсчета, а уравнения, описывающие эти законы, одинаковы по форме во всех инерциальных системах отсчета. Согласно этому постулату, все инерциальные системы отсчета совершенно равноправны, т. е. явления (механические, электродинамические, оптические и др.) во всех инерциальных системах отсчета протекают одинаково.

Второй постулат Эйнштейна (принцип постоянства скорости света): *скорость света в вакууме не зависит от скорости движения источника света или наблюдателя и одинакова во всех инерциальных системах отсчета.*

Второй постулат утверждает, что *постоянство скорости света — фундаментальное свойство природы.* Если все дру-

гие скорости изменяются при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой, то *скорость света в вакууме* — величина инвариантная (неизменная).

Из постулатов СТО следует, что скорость света c в вакууме — максимально возможная (предельная) скорость. Описываемые СТО явления (они получили название **релятивистских явлений**) наблюдаются при скоростях движения тел, *сравнимых* со скоростью распространения света в вакууме. СТО потребовала отказа от привычных представлений о пространстве и времени, принятых в классической механике, поскольку они противоречили принципу постоянства скорости света. Потеряло смысл не только абсолютное пространство, но и абсолютное время.

Постулаты Эйнштейна и теория, построенная на их основе, установили новый взгляд на мир и новые пространственно-временные представления, такие, например, как *относительность длин и промежутков времени, относительность одновременности событий*. Эти и другие следствия из теории Эйнштейна находят надежное экспериментальное подтверждение, являясь тем самым обоснованием постулатов Эйнштейна — обоснованием специальной теории относительности.

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

АБСОЛЮТНАЯ ВЛАЖНОСТЬ ВОЗДУХА — масса водяных паров, содержащихся в 1 м^3 воздуха при данных условиях. Ее значение оценивается по плотности водяного пара в воздухе. *Единица* — килограмм на кубический метр ($\text{кг}/\text{м}^3$), однако обычно ее выражают в $\text{г}/\text{м}^3$.

АВОГАДРО ЗАКОН — один из основных законов идеального газа: *м о л и любых газов при одинаковых температуре и давлении занимают одинаковые объемы*. При нормальных условиях этот объем равен $22,41 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{моль}$.

АВОГАДРО ПОСТОЯННАЯ (ЧИСЛО АВОГАДРО) — число атомов (молекул или других структурных единиц), содержащихся в одном моле различных веществ:

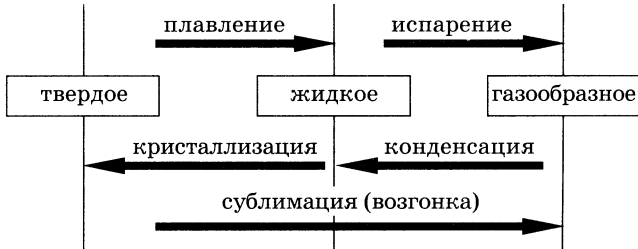
$$N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}.$$

Постоянная Авогадро — одна из *фундаментальных* физических постоянных.

АГРЕГАТНЫЕ СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА — состояния одного и того же вещества, переходы между которыми сопровождаются *скачкообразным изменением его физических свойств* (например, плотности, характера движения частиц, образующих вещество, и т. д.). Агрегатное состояние вещества зависит от условий, в которых оно находится, в основном от температуры и давления. Все вещества могут существовать в трех агрегатных состояниях — твердом, жидком и газообразном. Например,

вода при $p = 1,013 \cdot 10^5$ Па и $t = 0$ °С кристаллизуется в лед, а при 100 °С превращается в пар. Четвертым агрегатным состоянием вещества часто считают п л а з м у.

Изменение агрегатного состояния вещества



Переход в агрегатное состояние, отвечающее более высокой температуре, требует *подвода энергии*; переход же в агрегатное состояние, отвечающее более низкой температуре, сопровождается *выделением энергии*. Переходы из более упорядоченного по структуре агрегатного состояния в менее упорядоченное могут происходить не только при определенных температуре и давлении (см. К и п е н и е, П л а в л е н и е), но и непрерывно (см. Ф а з о в ы й п е р е х о д). Возможность непрерывных переходов говорит об условности выделения агрегатных состояний вещества, а поэтому в физике пользуются более широким понятием — ф а з ы.

АДИАБАТА — кривая, изображающая зависимость между термодинамическими параметрами, характеризующими свойства газа при $\Delta Q = 0$. На диаграмме в координатах p, V адиабата представляет собой *гиперболу*. На рис. 36 видно, что адиабата ($pV^\gamma = \text{const}$), более крута, чем изотерма ($pV = \text{const}$ — штриховая линия). Это объясняется тем, что при адиабатном сжатии 1—3 увеличение давления газа обусловлено не только уменьшением его объема, как при изотермическом сжатии, но и повышением температуры.

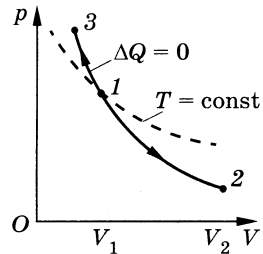


Рис. 36

Работа, совершаемая газом при адиабатном расширении 1—2 (определяется закрашенной на рис. 36 площадью), меньше, чем при изотермическом. Это связано с тем, что при адиабатном расширении происходит охлаждение газа, тогда как при изотермическом температура поддерживается постоянной за счет притока извне эквивалентного количества теплоты.

АДИАБАТНЫЙ ПРОЦЕСС — процесс, при котором отсутствует теплообмен между системой и окружающей средой: $\Delta Q = 0$. К адиабатным процессам можно отнести все быстропротекающие процессы, например процесс распространения звука в среде (скорость распространения звуковой волны настолько велика, что обмен энергией между волной и средой произойти не успевает).

Адиабатный процесс описывается уравнением Пуассона

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

где γ — **показатель адиабаты**. Адиабатные процессы применяются в двигателях внутреннего сгорания (расширение и сжатие горючей смеси в цилиндрах), в холодильных установках и т. д.

Применяя первое начало термодинамики ($Q = \Delta U + A$) к адиабатному процессу ($\Delta Q = 0$), получим

$$A = -\Delta U,$$

т. е. *работа внешних сил совершается за счет изменения внутренней энергии системы.*

Работа при адиабатном расширении газа от объема V_1 до объема V_2 (температура газа уменьшается от T_1 до T_2) будет равна:

$$A = \frac{m}{M} C_V (T_1 - T_2),$$

где C_V — молярная теплоемкость при постоянном объеме, m — масса газа, M — молярная масса газа.

АТОМ — наименьшая часть химического элемента, являющаяся носителем его свойств.

БОЙЛЯ—МАРИОТТА ЗАКОН — один из основных законов идеального газа: *для данной массы газа при постоянной температуре произведение давления газа на его объем есть величина постоянная:*

$$pV = \text{const} \quad \text{при} \quad T = \text{const}, \quad m = \text{const}.$$

Кривая, изображающая зависимость между термодинамическими параметрами, характеризующими свойства газа при постоянной температуре, называется **изотермой**. На диаграмме в координатах p, V изотермы представляют собой *гиперболы*, расположенные на графике тем выше, чем выше температура, при которой происходит процесс (рис. 37).

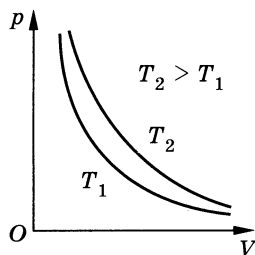


Рис. 37

БОЛЬЦМАНА ПОСТОЯННАЯ — одна из *фундаментальных* физических констант, равная отношению молярной газовой постоянной R к постоянной Авогадро N_A :

$$k = \frac{R}{N_A} = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К.}$$

ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

Так как в идеальном газе взаимная потенциальная энергия молекул равна нулю (молекулы между собой не взаимодействуют), то внутренняя энергия, отнесенная к одному молю газа, будет равна сумме кинетических энергий N_A молекул:

$$U_M = \frac{i}{2} k T N_A = \frac{i}{2} R T.$$

Для произвольной массы m газа:

$$U = \frac{m}{M} \frac{i}{2} R T = \nu \frac{i}{2} R T,$$

где M — молярная масса, ν — количество вещества.

Внутренняя энергия одноатомного идеального газа равна сумме кинетических энергий хаотического теплового движения его молекул (энергия взаимодействия молекул равна нулю):

$$U = N E_k,$$

где N — число молекул газа. Так как $N = \nu N_A$ (ν — количество вещества, N_A — постоянная Авогадро), получим

$$U = \nu N_A \frac{3}{2} k T,$$

где k — постоянная Больцмана. Учитывая, что $\nu = m/M$ (m — масса газа, M — молярная масса газа), а молярная газовая по-

стоянная $R = kN_A$, выражение для внутренней энергии идеального газа можно записать в виде

$$U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT.$$

По уравнению Клапейрона—Менделеева $\frac{m}{M} RT = pV$, следовательно,

$$U = \frac{3}{2} pV.$$

ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ U — энергия хаотического (теплого) движения микрочастиц системы (молекул, атомов, электронов, ядер и т. д.) и энергия взаимодействия этих частиц.

К внутренней энергии не относится кинетическая энергия движения системы как целого и потенциальная энергия системы во внешних полях.

Внутренняя энергия — *однозначная функция* термодинамического состояния системы, т. е. в каждом состоянии система обладает вполне определенной внутренней энергией (она не зависит от того, как система пришла в данное состояние). Это означает, что при переходе системы из одного состояния в другое изменение внутренней энергии определяется только разностью значений внутренней энергии этих состояний и не зависит от пути перехода.

ВТОРОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ — один из основных законов термодинамики, устанавливающий необратимость реальных термодинамических процессов.

Первое начало термодинамики, выражая закон сохранения и превращения энергии, не позволяет установить направление протекания термодинамических процессов. Кроме того, можно представить множество процессов, не противоречащих *первому началу термодинамики*, в которых энергия сохраняется, а в природе они не осуществляются. Появление второго начала термодинамики связано с необходимостью дать ответ на вопрос, какие процессы в природе возможны, а какие нет. *Второе начало термодинамики определяет направление протекания термодинамических процессов.*

Формулировки второго начала термодинамики:

1) по Кельвину: *невозможен круговой процесс, единственным результатом которого является превращение теплоты, полученной от нагревателя, в эквивалентную ей работу;*

вечный двигатель второго рода — периодически действующий двигатель, совершающий работу за счет охлаждения одного источника теплоты — невозможен;

2) по Клаузиусу: *невозможен круговой процесс, единственным результатом которого является передача теплоты от менее нагретого тела к более нагретому.*

В формулировках второго начала термодинамики следует обратить внимание на слова «*единственным результатом*», поскольку запреты второго начала сразу снимаются, если процессы, о которых идет речь, не являются единственными.

ГЕЙ-ЛЮССАКА ЗАКОН — закон теплового расширения идеальных газов: *объем данной массы газа при постоянном давлении изменяется линейно с температурой:*

$$V = V_0(1 + \alpha t) \text{ при } p = \text{const}, m = \text{const},$$

где t — температура по шкале Цельсия, V_0 — объем газа при 0°C ,

α — коэффициент термического расширения: $\alpha = 1/273 \text{ K}^{-1}$.

ГУКА ЗАКОН — основной закон теории упругости, выражающий линейную зависимость между напряжением (механическим) σ и относительным удлинением (сжатием) ε для малых деформаций:

$$\sigma = E\varepsilon,$$

где коэффициент пропорциональности E — модуль Юнга. **Модуль Юнга** характеризует сопротивляемость материала упругой деформации и определяется напряжением, вызывающим относительное удлинение, равное единице. Закон Гука выполняется только для упругих деформаций:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\sigma}{E} = \frac{F_{\text{упр}}}{ES}$$

(учли, что $\sigma = \frac{F_{\text{упр}}}{S}$), тогда $F_{\text{упр}} = \frac{ES}{l} \Delta l = k \Delta l$.

Это выражение — другой вид записи **закона Гука**, согласно которому *абсолютное удлинение тела при упругой деформации пропорционально действующей на тело силе*, где k — **жесткость тела** — величина, определяемая силой при единичной деформации. Из последней формулы также следует, что жесткость $k = \frac{ES}{l}$, т. е. прямо пропорциональна произведению модуля Юнга E на площадь поперечного сечения S тела и обратно пропорциональна его длине.

ДАЛЬТОНА ЗАКОН — один из законов идеального газа: *давление смеси идеальных газов равно сумме парциальных давлений p_1, p_2, \dots, p_n входящих в нее газов*:

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_n.$$

Парциальное давление — давление, которое производил бы газ, входящий в состав газовой смеси, если бы он один занимал объем, равный объему смеси при той же температуре.

ДЕФЕКТЫ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ — отклонения от упорядоченного расположения частиц в узлах решетки. **Дефекты** делятся на **макроскопические**, возникающие в процессе образования и роста кристаллов (например, трещины, поры, инородные макроскопические включения), и **микроскопические**, обусловленные микроскопическими отклонениями от периодичности.

Микродефекты делятся на **точечные** и **линейные**. Точечные дефекты бывают трех типов: 1) **вакансия** — отсутствие атома в узле кристаллической решетки (рис. 38, а); 2) **междоузельный атом** — атом, внедрившийся в междоузельное пространство (рис. 38, б); 3) **примесный атом** — атом примеси, либо замещающий атом основного вещества в кристаллической решетке (**примесь замещения**, рис. 38, в), либо внедрившийся в междоузельное пространство (**примесь внедрения**, рис. 38, б; только в междоузлии вместо атома основного вещества располагается атом примеси). Точечные дефекты нарушают лишь ближний порядок в кристаллах, не затрагивая дальнего порядка, — в этом состоит их характерная особенность.

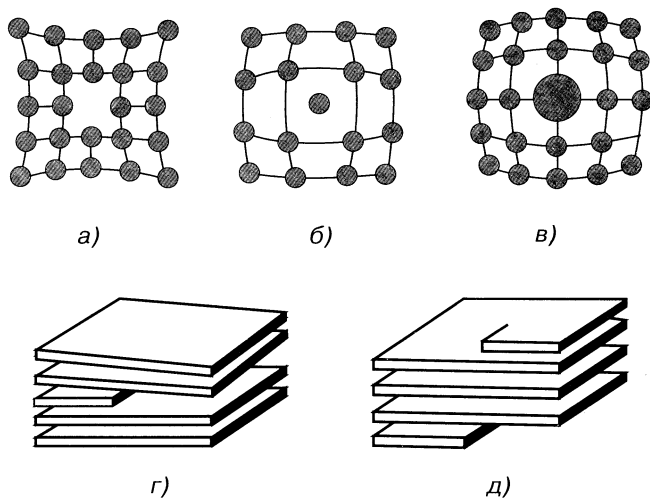


Рис. 38

Линейные дефекты нарушают дальний порядок. Как следует из опытов, механические свойства кристаллов в значительной степени определяются дефектами особого вида — дислокациями. **Дислокации** — линейные дефекты, нарушающие правильное чередование атомных плоскостей. Дислокации бывают **краевые** и **винтовые**. Если одна из атомных плоскостей обрывается внутри кристалла, то край этой плоскости образует краевую дислокацию (рис. 38, *в*). В случае винтовой дислокации (рис. 38, *д*) ни одна из атомных плоскостей внутри кристалла не обрывается, а сами плоскости лишь приблизительно параллельны и смыкаются друг с другом так, что фактически кристалл состоит из одной атомной плоскости, изогнутой по винтовой поверхности.

Наличие дефектов в кристаллической структуре влияет на свойства кристаллов.

ДЕФОРМАЦИЯ ТВЕРДОГО ТЕЛА — изменение формы и размеров твердых тел под действием внешних сил.

Деформация называется **упругой**, если после прекращения действия внешних сил тело принимает первоначальные размеры и форму. **Деформации**, которые сохраняются в теле после прекращения действия внешних сил, называются **пластиче-**

скими (или остаточными). Деформации реального тела всегда пластические, так как они после прекращения действия внешних сил никогда полностью не исчезают. Однако если остаточные деформации малы, то ими можно пренебречь и рассматривать упругие деформации. Все виды деформаций (*растяжение* или *сжатие*, *сдвиг*, *изгиб*, *кручение*) могут быть сведены к *одновременно проходящим деформациям растяжения или сжатия и сдвига.*

Количественной мерой, характеризующей степень деформации, является **относительная деформация** ε — физическая величина, определяемая отношением абсолютной деформации Δx к величине x (характеризует первоначальные размеры и форму тела). Так, **относительное продольное растяжение (сжатие)** $\varepsilon = \Delta l/l$ (Δl — изменение длины тела при растяжении (сжатии), l — длина тела до деформации), **относительное поперечное растяжение (сжатие)** $\varepsilon = \Delta d/d$ (Δd — изменение диаметра стержня при растяжении (сжатии), d — диаметр стержня).

ДИАГРАММА НАПРЯЖЕНИЙ — график зависимости напряжения σ от относительной деформации ε . Качественный вид этой зависимости от металлического образца приведен на рис. 39. Из рис. 39 следует, что линейная зависимость $\sigma(\varepsilon)$, установленная Гуком (з а к о н Г у к а), выполняется лишь в очень узких пределах до так называемого **предела пропорциональности** ($\sigma_{\text{п}}$). При дальнейшем увеличении напряжения деформация еще упругая (хотя зависимость $\sigma(\varepsilon)$ уже нелинейна) и до **предела упругости** ($\sigma_{\text{у}}$) остаточные деформации не возникают. За пределом упругости в теле возникают остаточные деформации и линия, описывающая возвращение тела в первоначальное состояние после прекращения действия силы, будет соответствовать не кривой BO , а прямой CF . Напряжение, при котором появляется заметная остаточная деформация ($\approx 0,2\%$), называется **пределом текучести** ($\sigma_{\text{т}}$) — точка C на кривой. В области CD деформация возрастает без увеличе-

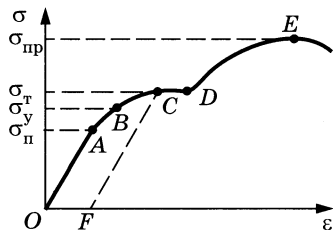


Рис. 39

ния напряжения, т. е. тело как бы течет. Эта область называется **областью текучести** (или **областью пластических деформаций**). **Материалы**, для которых область текучести значительна, называются **вязкими**, а для которых она практически отсутствует — **хрупкими**. При дальнейшем растяжении (за точку D) происходит разрушение тела. Максимальное напряжение, возникающее в теле до разрушения, называется **пределом прочности** ($\sigma_{\text{пр}}$).

ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ (ФАЗОВАЯ ДИАГРАММА) — это графическое изображение фазовых превращений, где в координатах p , T задается зависимость между температурой фазового перехода и давлением в виде кривых испарения (КИ), плавления (КП) и сублимации (КС), разделяющих поле диаграммы на три области, соответствующие условиям существования твердой (ТТ), жидкой (Ж) и газообразной (Г) фаз (рис. 40, а). Кривые на диаграмме называются **кривыми фазового равновесия**, каждая точка на них соответствует условиям равновесия двух сосуществующих фаз: КП — твердого тела и жидкости, КИ — жидкости и газа, КС — твердого тела и газа.

Точка, в которой пересекаются эти кривые и которая, следовательно, определяет условия (температуру $T_{\text{тр}}$ и соответствующее ей равновесное давление $p_{\text{тр}}$) одновременного равновесного сосуществования трех фаз вещества, называется **тройной точкой**. Каждое вещество имеет только одну тройную точку.

ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ, АНАЛИЗ. Диаграмма состояния, строящаяся на основе экспериментальных данных, позволяет судить, в каком состоянии находится данное вещество при определенном давлении p и температуре T , а также какие фазовые переходы будут происходить при том или ином процессе. Например, при условиях, соответствующих точке 1 (рис. 40, б), вещество находится в твердом состоянии, точке 2 — в газообразном, а точке 3 — одновременно в жидком и газообразном состояниях. Допустим, что вещество в твердом состоянии, соответствующем точке 4, подвергается изобарному нагреванию, изображенному на диаграмме состояния горизонтальной

штриховой прямой 4—5—6. Из рис. 40, б видно, что при температуре, соответствующей точке 5, вещество плавится, при более высокой температуре, соответствующей точке 6, — начинает превращаться в газ. Если же вещество находится в твердом состоянии, соответствующем точке 7, то при изобарном нагревании (штриховая прямая 7—8) кристалл превращается в газ, минуя жидкую фазу. Если вещество находится в состоянии, соответствующем точке 9, то при изотермическом сжатии (штриховая прямая 9—10) оно пройдет следующие три состояния: газ — жидкость — кристаллическое состояние.

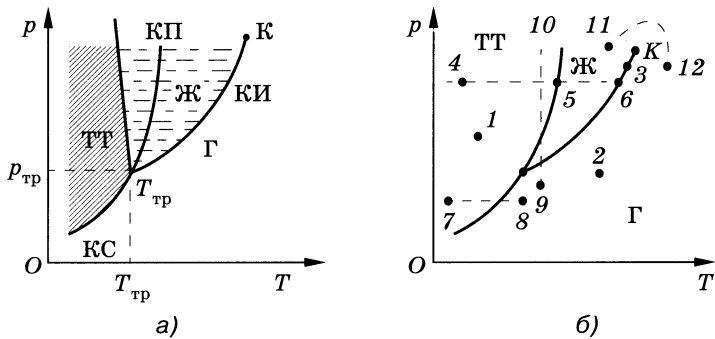


Рис. 40

а)

б)

На диаграмме состояний (см. рис. 40) видно, что кривая испарения заканчивается в критической точке K . Поэтому возможен *непрерывный* переход вещества из жидкого состояния в газообразное и обратно в обход критической точки, без пересечения кривой испарения (переход 11—12 на рис. 40, б), т. е. такой переход, который не сопровождается фазовыми превращениями. Переход же кристаллического состояния в жидкое или газообразное может быть только скачкообразным (в результате фазового перехода), поэтому кривые плавления и сублимации не могут обрываться, как это имеет место для кривой испарения в критической точке.

ЖИДКОСТЬ, СВОЙСТВА. Жидкость является агрегатным состоянием вещества, промежуточным между газообразным и твердым, поэтому она обладает свойствами как газообразных, так и твердых веществ. Жидкости, подобно твердым телам, обладают определенным объемом, а подобно газам, принимают

форму сосуда, в котором они находятся. Молекулы газа практически не связаны между собой силами межмолекулярного взаимодействия. Средняя энергия теплового движения молекул газа гораздо больше средней потенциальной энергии, обусловленной силами притяжения между ними, поэтому молекулы газа разлетаются в разные стороны и газ занимает предоставленный ему объем. В твердых и жидких телах силы притяжения между молекулами уже существенны и удерживают молекулы на определенном расстоянии друг от друга. В этом случае средняя энергия хаотического (теплового) движения молекул меньше средней потенциальной энергии, обусловленной силами межмолекулярного взаимодействия, и ее недостаточно для преодоления сил притяжения между молекулами, поэтому твердые тела и жидкости имеют определенный объем.

Рентгеноструктурный анализ жидкостей показал, что характер расположения частиц жидкости промежуточен между газом и твердым телом. В газах молекулы движутся хаотично, поэтому нет никакой закономерности в их взаимном расположении. Для твердых тел наблюдается так называемый *дальний порядок* в расположении частиц, т. е. их упорядоченное расположение, повторяющееся на больших расстояниях. В жидкостях имеет место так называемый *ближний порядок* в расположении частиц, т. е. их упорядоченное расположение, повторяющееся на расстояниях, сравнимых с межатомными.

Радиус молекулярного действия r — расстояние (порядка 10^{-9} м), при котором можно пренебречь силами притяжения между молекулами жидкости. Сфера радиуса r называется **сферой молекулярного действия**. Силы, с которыми молекулы, находящиеся внутри сферы молекулярного действия радиусом r , действуют на молекулу A (рис. 41), направлены в разные стороны и в среднем скомпенсированы, поэтому результирующая сила, действующая на молекулу внутри жидкости со сторо-

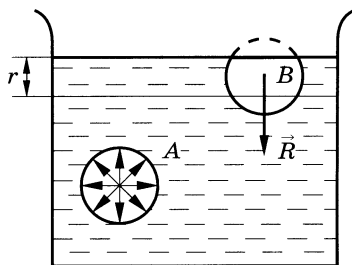


Рис. 41

ны других молекул, равна нулю. Для молекулы B сфера молекулярного действия лишь частично расположена внутри жидкости. В данном случае равнодействующая сил \vec{R} , приложенных к каждой молекуле поверхностного слоя, не равна нулю и направлена внутрь жидкости. Таким образом, результирующие силы всех молекул поверхностного слоя оказывают на жидкость **давление**, называемое **молекулярным** (или **внутренним**). Молекулярное давление не действует на тело, помещенное в жидкость, так как оно обусловлено силами, действующими только между молекулами самой жидкости.

ИЗОБАРНЫЙ ПРОЦЕСС — процесс, протекающий *при постоянном давлении* ($p = \text{const}$). Описывается законом Гей-Люссака:

$$V = V_0(1 + \alpha t) \quad \text{при } p = \text{const}, m = \text{const}. \quad (1)$$

На диаграмме в координатах V, t (рис. 42, а) этот процесс изображается прямой, называемой **изобарой**. Из уравнения (1) следует, что изобара пересекает ось температур в точке $t = -1/\alpha = -273^\circ\text{C}$, определяемой из условия $1 + \alpha t = 0$. Если перенести начало отсчета в эту точку (см. рис. 42, а), то можно перейти к шкале Кельвина:

$$T = t + 1/\alpha.$$

Вводя в формулу (1) термодинамическую температуру, закону Гей-Люссака можно придать более простой вид:

$$V = V_0(1 + \alpha t) = V_0[1 + \alpha(T - 1/\alpha)] = V_0\alpha T,$$

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad \text{при } p = \text{const}, m = \text{const},$$

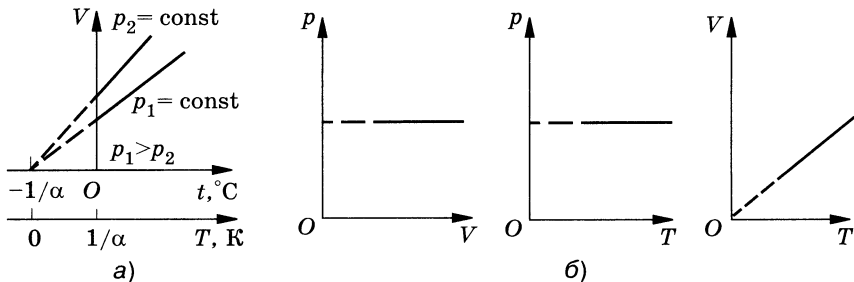


Рис. 42

где индексы 1 и 2 относятся к произвольным состояниям, лежащим на одной изобаре.

На рис. 42, б изобары представлены в координатах p, V ; p, T и V, T .

ИЗОПРОЦЕССЫ — процессы, при которых один из термодинамических параметров сохраняется постоянным.

ИЗОТЕРМА РЕАЛЬНОГО ГАЗА. На рис. 43 представлена изотерма реального газа в координатах p, V , имеющая вид ломаной линии 1—2—3—4. Участок 1—2 соответствует газообразному состоянию, участок 2—3 — двухфазному состоянию (жидкости и насыщенному пару), участок 3—4 — жидкости. С повышением температуры горизонтальный участок 2—3 изотерм сужается и при некоторой температуре, называемой критической, изотерма реального газа имеет вид верхней кривой, изображенной на рис. 43. Точка перегиба K называется **критической точкой**, в этой точке касательная к изотерме параллельна оси абсцисс. **Критическая температура** $T_{кр}$ — температура, при которой исчезают различия в физических свойствах между жидкостью и насыщенным паром. В критической точке K (рис. 44)

$$\rho_{н. п} = \rho_{к}.$$

Состояние вещества, в котором плотности жидкости и насыщенного пара становятся одинаковыми и исчезает граница между жидкостью и паром, называется **критическим состоянием**. Критическое состояние определяется критическими параметрами $T_{кр}$, $p_{кр}$, $V_{кр}$ ($p_{кр}$ — **критическое давление**, $V_{кр}$ — **критический объем**).

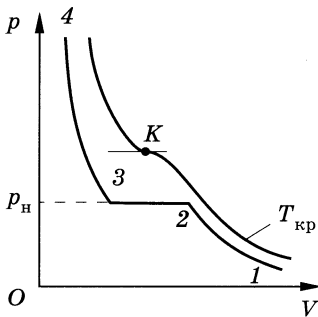


Рис. 43

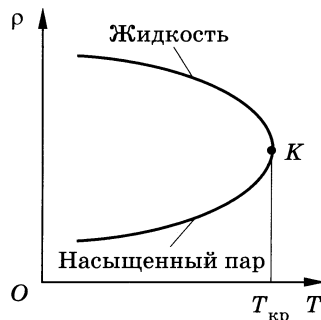


Рис. 44

Вещество в газообразном состоянии при температуре ниже критической называется паром.

Если через крайние точки горизонтальных участков различных изотерм провести линию, то получится колоколообразная кривая (рис. 45), ограничивающая область двухфазных состояний вещества. Эта кривая и критическая изотерма делят диаграмму p, V под критической изотермой на три области: под колоколообразной кривой располагается область двухфазных состояний (жидкость и насыщенный пар), слева от нее находится область жидкого состояния, а справа — область пара. Пар отличается от остальных газообразных состояний тем, что при изотермическом сжатии претерпевает процесс сжижения. Газ же при температуре выше критической не может быть превращен в жидкость ни при каком давлении.

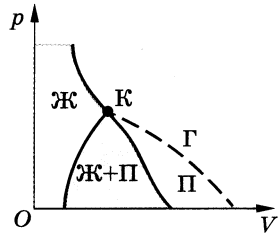


Рис. 45

ИЗОТЕРМИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС — процесс, протекающий *при постоянной температуре* ($T = \text{const}$). Описывается законом Бойля — Мариотта

$$pV = \text{const} \text{ при } T = \text{const}, m = \text{const}.$$

Закону Бойля—Мариотта можно придать вид

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{V_1}{V_2} \text{ при } T = \text{const}, m = \text{const},$$

где индексы 1 и 2 относятся к произвольным состояниям, лежащим на одной изотерме.

На рис. 46 и з о т е р м ы представлены в координатах p, V ; p, T и V, T .

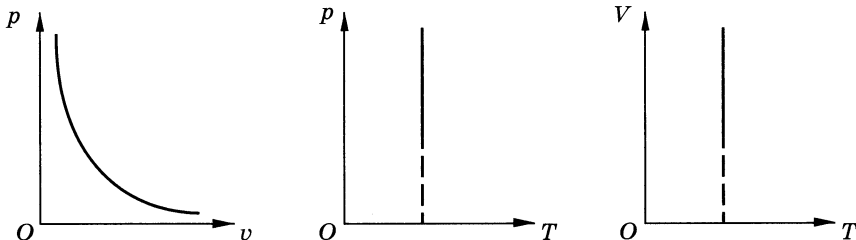


Рис. 46

ИЗОХОРНЫЙ ПРОЦЕСС — процесс, протекающий *при постоянной объеме* ($V = \text{const}$). Описывается **з а к о н о м Ш а р л я**:

$$p = p_0(1 + \alpha t) \text{ при } V = \text{const}, m = \text{const}. \quad (1)$$

На диаграмме в координатах p, t (рис. 47, *a*) этот процесс изображается прямой, называемой **изохорой**. Из уравнения (1) следует, что изохора, как и изобара (см. **И з о б а р н ы й п р о ц е с с**), пересекает ось температур в точке $t = -\frac{1}{\alpha} = -273^\circ\text{C}$. Перенеся начало отсчета в эту точку (см. рис. 47, *a*), перейдем к шкале Кельвина:

$$T = t + \frac{1}{\alpha}.$$

Вводя в формулу (1) термодинамическую температуру, закон Шарля примет более простой вид:

$$p = p_0(1 + \alpha t) = p_0 [1 + \alpha(T - 1/\alpha)] = p_0 \alpha T,$$

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2} \text{ при } V = \text{const}, m = \text{const},$$

где индексы 1 и 2 относятся к произвольным состояниям, лежащим на одной изохоре.

На рис. 47, *б* изохоры представлены в координатах $p, V; p, T$ и V, T .

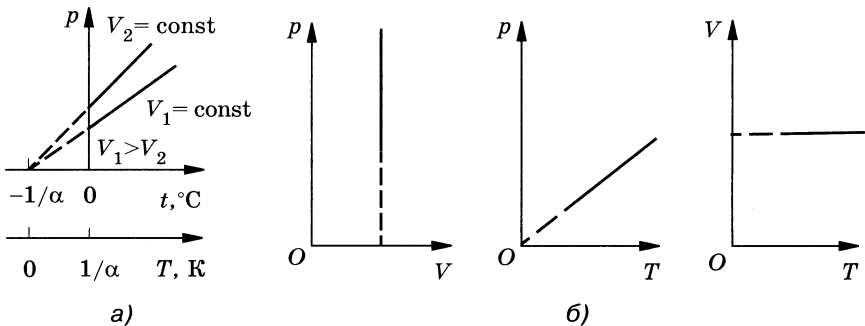


Рис. 47

ИСПАРЕНИЕ — п а р о о б р а з о в а н и е, происходящее при любой температуре со свободной поверхности жидкости.

В жидкостях и твердых телах всегда имеется некоторое число молекул, кинетическая энергия которых достаточна для преодоления сил притяжения к другим молекулам и которые способны оторваться от поверхности жидкости или твердого тела и перейти в окружающее их пространство. Испарение жидкостей идет при любой температуре, но его интенсивность с повышением температуры возрастает.

Испарение твердых тел называется **сублимацией (возгонкой)**. Для большинства твердых тел процесс сублимации при обычных температурах незначителен и давление пара над поверхностью твердого тела мало; оно повышается с повышением температуры. Интенсивно сублимируют такие вещества, как нафталин, камфора, что обнаруживается по резкому, свойственному им запаху. Особенно интенсивно сублимация происходит в вакууме — этим пользуются для изготовления зеркал. Известный пример сублимации — превращение льда в пар — мокрое белье высыхает на морозе.

Испарения и сублимация происходят с поглощением энергии.

КАПИЛЛЯР — узкая цилиндрическая трубка с диаметром около миллиметра и менее.

КАПИЛЛЯРНЫЕ ЯВЛЕНИЯ — явления, вызывающие изменение высоты уровня жидкости в капиллярах. Если капилляр поместить одним концом в жидкость, налитую в широкий сосуд (рис. 48), то вследствие смачивания или несмачивания жидкостью стенок капилляра кривизна поверхности жидкости в капилляре становится значительной. Поверхность жидкости, искривленная внутри капилляра (или в общем случае на границе с твердым телом), называется **мениском**. Если жидкость смачивает материал, из которого изготовлен капилляр, то мениск имеет *вогнутую форму* (рис. 48, а), если не смачивает — *выпуклую* (рис. 48, б).

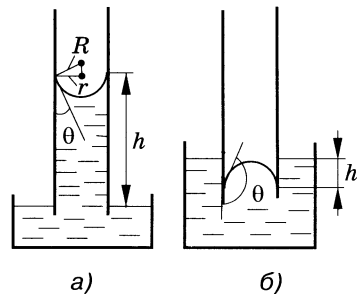


Рис. 48

Под вогнутой поверхностью жидкости возникает отрицательное избыточное давление, в результате жидкость в капилляре поднимается, так как под плоской поверхностью жидкости в широком сосуде избыточного давления нет. Если же жидкость не смачивает стенки капилляра, то положительное избыточное давление приведет к опусканию жидкости в капилляре.

Высота поднятия (глубина опускания) жидкости в капилляре рассчитывается по формуле:

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g R} = \frac{2\sigma}{\rho g r} \cdot \cos \theta,$$

где ρ — плотность жидкости; r — радиус капилляра; R — радиус кривизны поверхности; g — ускорение свободного падения, θ — краевой угол.

КАРНО ТЕОРЕМА. Из всех периодически действующих тепловых машин, имеющих одинаковые температуры нагревателей (T_1) и холодильников (T_2), наибольшим КПД обладают обратимые машины; при этом КПД обратимых машин, работающих при одинаковых температурах нагревателей (T_1) и холодильников (T_2), равны друг другу и не зависят от природы рабочего тела (тела, совершающего круговой процесс и обменивающегося энергией с другими телами), а определяются только температурами нагревателя и холодильника.

КАРНО ЦИКЛ — о б р а т и м ы й круговой процесс, состоящий из двух изотермических и двух адиабатных процессов.

В качестве рабочего тела в этом цикле используется идеальный газ, заключенный в сосуд с подвижным поршнем.

Цикл Карно изображен на рис. 49, где изотермические расширение и сжатие заданы соответственно кривыми 1—2 и 3—4, а адиабатные расширение и сжатие — кривыми 2—3 и 4—1. Рассмотрим последовательные термодинамические процессы в *прямом цикле Карно*.

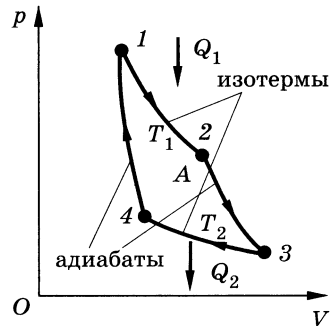


Рис. 49

1. *Изотермическое расширение (1—2):* $T_1 = \text{const}$; $V_2 > V_1$; $p_2 < p_1$. Подведенная теплота Q_1 равна работе расширения A_{12} , совершенной газом при переходе из состояния 1 в состояние 2: $Q_1 = A_{12}$.

2. *Адиабатное расширение (2—3):* $T_2 < T_1$; $V_3 > V_2$; $p_3 < p_2$. Теплообмен с окружающей средой отсутствует и работа расширения A_{23} совершается за счет изменения внутренней энергии: $A_{23} = -\Delta U$.

3. *Изотермическое сжатие (3—4):* $T_2 = \text{const}$; $V_4 < V_3$; $p_4 > p_3$. Количество теплоты Q_2 , отданной газом холодильнику при изотермическом сжатии, равно работе сжатия A_{34} : $A_{34} = -Q_2$.

4. *Адиабатное сжатие (4—1):* $T_1 > T_2$; $V_1 < V_4$; $p_1 > p_4$. Работа адиабатного сжатия $A_{41} = -A_{23}$.

Работа за цикл: $A = A_{12} + A_{23} + A_{34} + A_{41} = Q_1 + A_{23} - Q_2 - A_{23} = Q_1 - Q_2$ и определяется площадью, ограниченной рассматриваемыми изотермами и адиабатами.

Термический коэффициент полезного действия цикла Карно

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

Для повышения КПД необходимо увеличивать разность температур нагревателя и холодильника. Например, при $T_1 = 400$ К и $T_2 = 300$ К $\eta = 0,25$. Если же температуру нагревателя повысить на 100 К, а температуру холодильника понизить на 50 К, то $\eta = 0,5$. КПД всякого реального теплового двигателя из-за трения и неизбежных тепловых потерь гораздо меньше вычисленного для цикла Карно.

КИПЕНИЕ — п а р о б р а з о в а н и е во всем объеме жидкости при *определенной*, сильно зависящей от давления *температуре кипения*. С увеличением внешнего давления температура кипения повышается (и наоборот). Температура кипения равна температуре конденсации.

КЛАПЕЙРОНА—МЕНДЕЛЕЕВА УРАВНЕНИЕ ДЛЯ 1 МОЛЬ ГАЗА — см. Уравнение состояния идеального газа.

КЛАПЕЙРОНА—МЕНДЕЛЕЕВА УРАВНЕНИЕ ДЛЯ ПРОИЗВОЛЬНОЙ МАССЫ ГАЗА — см. Уравнение состояния идеального газа.

КОЛИЧЕСТВО ВЕЩЕСТВА ν — физическая величина, определяемая числом специфических структурных элементов — молекул, атомов или ионов, из которых состоит вещество.

Единица — **моль (основная единица)** (см. Единицы физических величин).

КОНДЕНСАЦИЯ — переход вещества вследствие его охлаждения или сжатия из газообразного состояния в жидкое или твердое. Конденсация происходит с выделением энергии. Если число молекул, покидающих жидкость за единицу времени через единицу поверхности, равно числу молекул, переходящих из пара в жидкость, то наступает *динамическое равновесие* между процессами испарения и конденсации. **Пар**, находящийся в равновесии со своей жидкостью, называется **насыщенным**.

КООРДИНАЦИОННОЕ ЧИСЛО — число ближайших однотипных с данным атомом соседних атомов в кристаллической решетке или молекул в молекулярных кристаллах. Для модельного изображения кристаллических структур из атомов и ионов пользуются системой плотной упаковки шаров. Рассматривая простейший случай плотной упаковки шаров одинакового радиуса на плоскости, приходим к двум способам их расположения (рис. 50, а, б). Правая упаковка является более плотной, так как при равном числе шаров площадь ромба со стороной, равной стороне квадрата, меньше

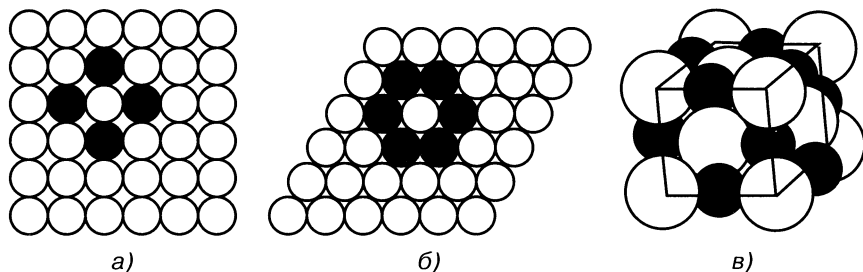


Рис. 50

площади квадрата. Как видно из рисунка, различие в упаковках сводится к различию координационных чисел: в левой упаковке координационное число равно 4, в правой — 6, т. е. чем плотнее упаковка, тем больше координационное число.

Если кристалл построен из атомов разных элементов, то его можно представить в виде плотной упаковки шаров различных размеров. На рис. 50, в приведено модельное изображение кристалла поваренной соли (NaCl). Крупные ионы хлора ($r = 181$ пм) образуют плотную трехслойную упаковку, у которой большие пустоты заполнены меньшими по размеру ионами натрия ($r = 98$ пм). Каждый ион Na окружен шестью ионами Cl, и, наоборот, каждый ион Cl — шестью ионами Na.

КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ (ЗАТВЕРДЕВАНИЕ) — переход вещества из жидкого состояния в кристаллическое (твердое). Для химически чистой жидкости этот процесс идет при *постоянной температуре кристаллизации* (она равна температуре плавления) (см. П л а в л е н и е).

Если жидкость охлаждать (на рис. 51 изображена примерная зависимость $T(Q')$, где Q' — количество теплоты, отдаваемое телом при кристаллизации), то сначала температура жидкости понижается, затем при постоянной температуре, равной $T_{пл}$, начинается **кристаллизация**,

после ее завершения температура кристалла начнет понижаться. Для кристаллизации вещества необходимо наличие так называемых **центров кристаллизации** — кристаллических зародышей, которыми могут быть, например, кристаллики меньшей температуры кристаллизации, при этом образуется **переохлажденная жидкость** (на рис. 51 ей соответствует пунктирная кривая). При сильном переохлаждении начинается спонтанное образование центров кристаллизации и вещество кристаллизуется довольно быстро.

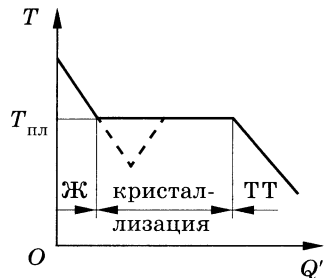


Рис. 51

КРИСТАЛЛЫ, ТИПЫ. Кристаллы можно классифицировать по кристаллографическому и физическому признакам. В первом

случае важна только пространственная периодичность в расположении частиц, поэтому можно отвлечься от их внутренней структуры, рассматривая частицы как геометрические точки. Во втором случае важна природа частиц, расположенных в узлах кристаллической решетки, и характер сил взаимодействия между ними.

По физическому признаку кристаллы делятся на 4 типа.

1. Ионные кристаллы. В узлах кристаллической решетки поочередно располагаются ионы противоположного знака (типичный представитель — NaCl, рис. 52).

Связь, обусловленная кулоновскими силами притяжения между разноименно заряженными ионами, называется **ионной**. Здесь нельзя выделить отдельные молекулы: кристалл представляет собой как бы одну гигантскую молекулу.

2. Атомные кристаллы. В узлах кристаллической решетки располагаются нейтральные атомы, удерживающиеся в узлах решетки **ковалентными связями** (у соседних атомов обобществлены валентные электроны, наименее связанные с атомом). Типичные представители: алмаз, графит, германий и т. д. Структура решетки алмаза приведена на рис. 53.

3. Металлические кристаллы. В узлах кристаллической решетки располагаются положительные ионы металла. При образовании кристаллической решетки валентные электроны, сравнительно слабо связанные с атомами, отделяются от атомов и коллективизируются: они уже принадлежат не одному атому, как в случае ионной связи, и не паре соседних атомов, как в случае ковалентной связи, а всему кристаллу в целом. Таким образом, в металлах между положительными ионами

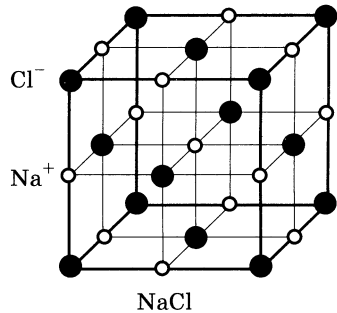


Рис. 52

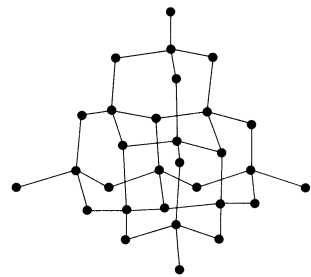


Рис. 53

хаотически, подобно молекулам газа, движутся «свободные» электроны, наличие которых обеспечивает хорошую электропроводность металлов. Чаще всего металлы встречаются в виде поликристаллов.

4. Молекулярные кристаллы. В узлах кристаллической решетки располагаются нейтральные молекулы вещества, силы взаимодействия между которыми обусловлены незначительным взаимным смещением электронов в электронных оболочках атомов. Эти силы имеют ту же природу, что и силы притяжения между молекулами, приводящими к отклонению газов от идеальности. Молекулярными кристаллами являются, например, многие органические соединения (парафин, спирт), инертные газы (Ne, Ar, Kr, Xe), лед, а также кристаллы брома Br_2 , иода I_2 .

КРУГОВОЙ ПРОЦЕСС (ЦИКЛ) — процесс, при котором система, пройдя через ряд состояний, возвращается в исходное. На диаграмме p, V цикл изображается замкнутой кривой (рис. 54, а, б). Цикл, совершаемый идеальным газом, можно разбить на процессы расширения ($1-2$) и сжатия ($2-1$) газа. *Работа расширения* (определяется площадью фигуры $1a2V_2V_11$) *положительна* ($dV > 0$), *работа сжатия* (определяется площадью фигуры $2b1V_1V_22$) *отрицательна* ($dV < 0$). Следовательно, работа, совершаемая газом за цикл, определяется площадью, охватываемой замкнутой кривой. **Цикл**, при котором совершается положительная работа ($A > 0$), называется **прямым** (цикл

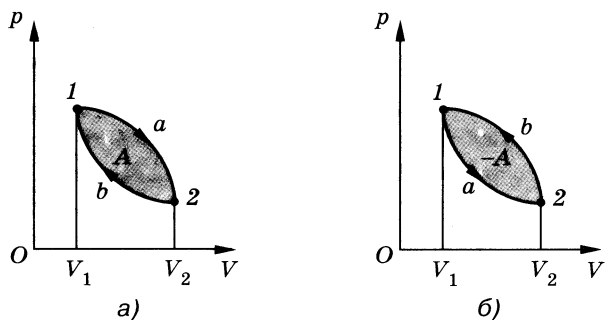


Рис. 54

протекает по часовой стрелке; рис. 54, а). **Цикл**, при котором совершается отрицательная работа ($A < 0$), называется **обратным** (цикл протекает против часовой стрелки; рис. 54, б).

Прямой цикл используется в тепловых двигателях — периодически действующих двигателях, совершающих работу за счет полученной извне теплоты. Обратный цикл используется в холодильных машинах — периодически действующих установках, в которых за счет работы внешних сил теплота переносится к телу с более высокой температурой.

Первое начало термодинамики для кругового процесса можно записать в виде

$$Q = \Delta U + A = A$$

(в результате кругового процесса система возвращается в исходное состояние, следовательно, $\Delta U = 0$), т. е. работа, совершаемая за цикл, равна количеству полученной извне теплоты. Однако в результате кругового процесса система может тепло как получать, так и отдавать, поэтому

$$Q = Q_1 - Q_2,$$

где Q_1 — количество теплоты, полученное системой, Q_2 — количество теплоты, отданное системой.

Термический коэффициент полезного действия для кругового процесса

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}.$$

ЛОШМИДА ЧИСЛО — число молекул, содержащихся в 1 м^3 газа при *нормальных условиях*. Записав уравнение состояния идеального газа в виде

$$p = nkT$$

(n — концентрация молекул, k — постоянная Больцмана), видим, что при одинаковых температуре и давлении все газы содержат в единице объема одинаковое число молекул. Тогда при нормальных условиях ($p_0 = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$, $T_0 = 273,15 \text{ К}$, $V_M = 22,41 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{моль}$) число Лошмидта

$$N_{\text{л}} = \frac{p_0}{kT_0} = 2,68 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}.$$

МОЛЕКУЛА — наименьшая устойчивая частица вещества, обладающая его основными химическими свойствами и состоящая из атомов, соединенных между собой химическими связями. Число атомов в молекуле колеблется от двух (H_2 , NaCl) до сотен и тысяч (например, белки). Размеры молекул порядка 10^{-10} — 10^{-7} м.

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА — раздел физики, в котором изучаются строение и свойства вещества в различных агрегатных состояниях исходя из молекулярно-кинетических представлений, основывающихся на том, что все тела состоят из молекул, находящихся в непрерывном хаотическом движении.

Процессы, изучаемые молекулярной физикой, являются результатом совокупного действия огромного числа молекул. Законы поведения огромного числа молекул, являясь *статистическими закономерностями*, изучаются с помощью **статистического метода** — метод исследования систем из большого числа частиц, оперирующего *статистическими закономерностями и средними значениями физических величин*, характеризующих всю совокупность частиц (например, средние значения скоростей теплового движения молекул и их энергий). Например, температура тела определяется скоростью хаотического движения его молекул, но так как в любой момент времени разные молекулы имеют различные скорости, то она может быть выражена только через среднее значение скорости движения молекул. Нельзя говорить о температуре одной молекулы. Таким образом, макроскопические характеристики тел имеют физический смысл лишь в случае большого числа молекул.

МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ, ОПЫТНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ

1. **Броуновское движение.** Шотландский ботаник Броун, наблюдая под микроскопом взвесь цветочной пыльцы в воде, обнаружил, что частицы пыльцы оживленно и беспорядочно двигались, то вращаясь, то перемещаясь с места на место, подобно пылинкам в солнечном луче. Впоследствии оказалось,

что подобное сложное зигзагообразное движение характерно для любых частиц малых размеров (≈ 1 мкм), взвешенных в газе или жидкости. Это движение называется броуновским. Его интенсивность повышается с ростом температуры среды, с уменьшением вязкости и размеров частиц (независимо от их химической природы). Причина броуновского движения долго оставалась неясной. Лишь через 80 лет после обнаружения этого эффекта ему было дано объяснение: броуновское движение взвешенных частиц вызывается ударами молекул окружающей среды. Так как молекулы движутся хаотически, то броуновские частицы получают толчки с разных сторон, поэтому и совершают движение столь причудливой формы. Таким образом, броуновское движение является подтверждением выводов молекулярно-кинетической теории о хаотическом (тепловом) движении атомов и молекул.

2. Диффузия — это взаимное проникновение молекул одного вещества в межмолекулярные промежутки другого вещества в результате их хаотического движения и столкновений друг с другом (наблюдается в газах, жидкостях и твердых телах).

3. Опыт Штерна — первое экспериментальное определение скоростей молекул и оценка распределения молекул по скоростям. Схема установки Штерна представлена на рис. 55. Вдоль оси внутреннего цилиндра с целью натянута платиновая проволока, покрытая слоем серебра, которая нагревается током при откачанном воздухе. При нагревании серебро испаряется. Атомы серебра, вылетая через щель, попадают на внутреннюю поверхность второго цилиндра, давая изображение щели O . Если прибор привести во вращение вокруг общей оси цилиндров, то атомы серебра осядут не против щели, а сместятся от точки O на некоторое расстояние s . Изображение щели получается размытым. Исследуя толщину осажденного слоя, можно оценить распределение молекул по скоростям, которое соответствует максвелловскому распределению.

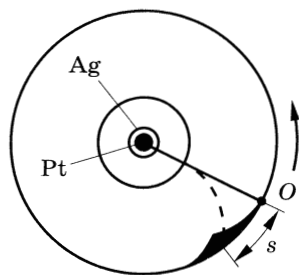


Рис. 55

МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ, ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ.

В основе молекулярно-кинетической теории лежат следующие представления:

1. Все тела состоят из молекул (атомов).
2. Молекулы находятся в непрерывном хаотическом движении, в результате которого они имеют разные скорости.
3. Между молекулами (атомами) существуют силы взаимодействия — силы притяжения и отталкивания (о силах межмолекулярного взаимодействия см. также **Р е а л ь н ы й г а з**).

МОЛЯРНАЯ ГАЗОВАЯ ПОСТОЯННАЯ. Для определения числового значения молярной газовой постоянной R рассмотрим уравнение Клапейрона — Менделеева для 1 моль газа

$$pV_M = RT,$$

полагая, что моль газа находится при нормальных условиях ($p_0 = 1,013 \cdot 10^5$ Па, $T_0 = 273,15$ К, $V_M = 22,41 \cdot 10^{-3}$ м³/моль). Подставив эти значения в уравнение, получим

$$R = 8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}).$$

Молярная газовая постоянная относится к *фундаментальным* физическим постоянным.

Если идеальный газ изобарно расширяется от объема V_1 до объема V_2 , то работа внешних сил

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

Применяя уравнение Клапейрона — Менделеева ($pV = \frac{m}{M} RT$) для выбранных состояний 1 и 2, получим

$$A = \frac{m}{M} R(T_2 - T_1).$$

Из этого выражения вытекает *физический смысл молярной газовой постоянной R* : если $T_2 - T_1 = 1$ К, то для 1 моль газа $R = A$, т. е. R численно равна работе изобарного расширения 1 моль идеального газа при нагревании его на 1 К.

МОЛЯРНАЯ МАССА ВЕЩЕСТВА — физическая величина, равная отношению массы m однородной системы к количеству вещества ν этой системы:

$$M = \frac{m}{\nu}.$$

Единица молярной массы — **килограмм на моль** (кг/моль): 1 кг/моль равен молярной массе вещества, имеющего при количестве вещества 1 моль массу 1 кг.

Молярную массу можно рассчитать также по формуле $M = m_0 N_A$, где m_0 — масса молекулы, N_A — постоянная Авогадро.

МОЛЯРНЫЙ ОБЪЕМ — физическая величина, равная отношению объема однородной массы системы к количеству вещества системы:

$$V_M = \frac{V}{\nu}.$$

Единица молярного объема — **кубический метр на моль** ($\text{м}^3/\text{моль}$): $1 \text{ м}^3/\text{моль}$ равен молярному объему вещества, занимающего при количестве вещества 1 моль объем 1 м^3 .

НАПРЯЖЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЕ — физическая величина, определяемая силой упругости, действующей на единицу площади поперечного сечения тела:

$$\sigma = \frac{F_{\text{упр}}}{S},$$

где $F_{\text{упр}}$ — сила упругости, S — площадь сечения тела.

Единица напряжения — **паскаль** (Па): 1 Па равен давлению, вызываемому силой 1 Н, равномерно распределенной по нормальной к ней поверхности площадью 1 м^2 .

Если сила направлена по нормали к поверхности, то **напряжение** называют **нормальным**, если же сила направлена по касательной к поверхности, то **напряжение** **тангенциальное**.

НАСЫЩЕННЫЙ ПАР. Если парообразование происходит в *закрытом сосуде*, то одновременно с этим процессом идет и процесс конденсации. Через некоторое время наступит динамическое равновесие между двумя процессами, и перестает меняться количество жидкости и находящегося над ней пара. **Насыщенный пар** — пар, находящийся в состоянии термодинамического равновесия со своей жидкостью.

Давление насыщенного пара зависит только от его химического состава и температуры, причем давление пара с повышением температуры растет. На рис. 56 представлены зависимость давления от температуры при постоянном объеме для насыщенного пара (кривая 1) и для идеального газа (кривая 2).

Пар называется **ненасыщенным**, если при данной температуре его давление меньше давления насыщенного пара ($p < p_n$).

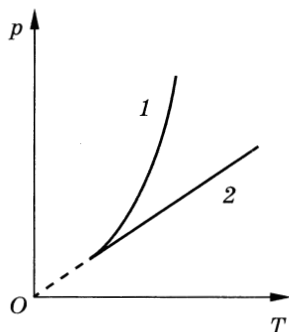


Рис. 56

ОБРАТИМЫЙ ПРОЦЕСС — термодинамический процесс, который может протекать как в прямом, так и в обратном направлении, причем если такой процесс идет сначала в прямом, а затем в обратном направлении и система возвращается в исходное состояние, то при этом в окружающей среде и в самой системе не происходит никаких изменений. Всякий процесс, не удовлетворяющий таким условиям, является **необратимым**.

Любой равновесный процесс является обратимым. Обратимость равновесного процесса, происходящего в системе, следует из того, что ее любое промежуточное состояние есть состояние термодинамического равновесия; для него «безразлично», идет процесс в прямом или обратном направлении. Реальные процессы сопровождаются диссипацией энергии (из-за трения, теплопроводности и т. д.). *Обратимые процессы — это идеализация реальных процессов.* Их рассмотрение важно по двум причинам: 1) многие процессы в природе и технике практически обратимы; 2) обратимые процессы являются наиболее экономичными; имеют максимальный термический коэффициент полезного действия, что позволяет указать пути повышения КПД реальных тепловых двигателей.

ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ. Для вывода этого уравнения обычно рассматривают одноатом-

ный газ, считается, что молекулы газа движутся хаотически, число взаимных столкновений между молекулами газа пренебрежимо мало по сравнению с числом ударов о стенки сосуда, а соударения молекул со стенками сосуда абсолютно упругие. Для упрощения расчетов хаотическое движение молекул заменяют движением вдоль трех взаимно перпендикулярных направлений, так что в любой момент времени вдоль каждого из них движется $1/3$ молекул, причем половина из этих молекул ($1/6$) движется вдоль данного направления в одну сторону, половина — в противоположную. При подобных допущениях основное уравнение молекулярно-кинетической теории имеет вид:

$$p = \frac{1}{3} n m_0 \langle v_{\text{кв}} \rangle^2, \quad (1)$$

где p — давление газа, n — концентрация молекул, m_0 — масса

одной молекулы, $\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i^2}$ — **средняя квадратичная скорость** молекул (считается, что в объеме V имеется N молекул, движущихся со скоростями v_1, v_2, \dots, v_n . Отметим, что

точный расчет с учетом движения молекул по всем направлениям дает ту же формулу (1).

Учитывая, что $n = N/V$, получим

$$pV = \frac{1}{3} N m_0 \langle v_{\text{кв}} \rangle^2 \text{ или}$$

$$pV = \frac{2}{3} N \frac{m_0 \langle v_{\text{кв}} \rangle^2}{2} = \frac{2}{3} E, \quad (2)$$

где E — суммарная кинетическая энергия поступательного движения всех молекул газа. Так как масса газа $m = N m_0$, то уравнение (2) можно переписать в виде

$$pV = \frac{1}{3} m \langle v_{\text{кв}} \rangle^2. \quad (3)$$

Уравнения (1)—(3) представляют собой разные формы записи основного уравнения молекулярно-кинетической теории.

ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ВЛАЖНОСТЬ ВОЗДУХА — выраженное в процентах отношение парциального давления p водяного пара, содержащегося в воздухе при данной температуре, к давлению $p_{\text{н}}$ насыщенного пара при той же температуре:

$$\varphi = \frac{p}{p_{\text{н}}} \cdot 100\%.$$

ПАРООБРАЗОВАНИЕ — процесс перехода вещества из жидкого состояния в газообразное. Парообразование происходит с поглощением энергии.

ПЕРВОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ — один из основных законов термодинамики, выражающий *закон сохранения энергии* для термодинамических процессов.

Рассмотрим термодинамическую систему, для которой механическая энергия постоянна и меняется лишь ее внутренняя энергия. Внутреннюю энергию системы можно изменить, если *сообщить ей некоторое количество теплоты* или *совершить над ней работу* (например, при сжатии поршнем газа, помещенного в цилиндр, повышается температура газа, а следовательно, и его внутренняя энергия). Можно говорить, таким образом, о *двух формах передачи энергии* от одних тел к другим: *работе и теплоте*.

Энергия механического движения может превращаться в энергию теплового движения, и наоборот. При этих превращениях соблюдается закон сохранения и превращения энергии; применительно к термодинамическим процессам этим законом и является первое начало термодинамики, установленное в результате обобщения многовековых опытных данных.

Допустим, что некоторая система (газ, заключенный в цилиндр под поршнем), обладая внутренней энергией U_1 , получила некоторое количество теплоты Q и, перейдя в новое состояние, характеризующееся внутренней энергией U_2 , совершила работу A над внешней средой, т. е. против внешних сил.

Количество теплоты считается положительным, когда оно подводится к системе, а работа — положительной, когда система совершает ее против внешних сил. Опыт показывает, что в соответствии с законом сохранения энергии при любом способе перехода системы из первого состояния во второе изменение внутренней энергии $\Delta U = U_2 - U_1$ будет одинаковым и равно разности между количеством теплоты Q , полученным системой, и работой A , совершенной системой против внешних сил:

$$\Delta U = Q - A,$$

или

$$Q = \Delta U + A. \quad (1)$$

Уравнение (1) является математическим выражением **первого начала термодинамики**: *теплота, сообщаемая системе, расходуется на изменение ее внутренней энергии и на совершение ею работы против внешних сил.*

Первое начало термодинамики может быть представлено в виде

$$\Delta U = A' + Q, \quad (2)$$

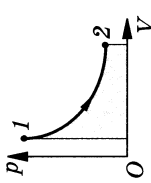
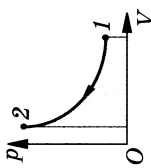
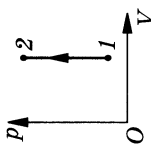
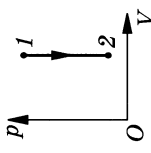
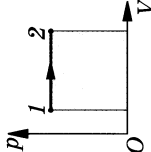
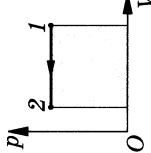
т. е. *изменение внутренней энергии системы при переходе ее из одного состояния в другое равно сумме совершенной над системой работы A' и полученной системой теплоты Q .* В формулах (2) и (1) $A' = -A$.

Если система периодически возвращается в первоначальное состояние, то изменение ее внутренней энергии $\Delta U = 0$. Тогда, согласно первому началу термодинамики, работа, совершаемая системой против внешних сил, равна количеству теплоты, переданному системе:

$$A = Q,$$

т. е. **вечный двигатель первого рода** — периодически действующий двигатель, который совершал бы большую работу, чем сообщенная ему извне энергия, — невозможен (**одна из формулировок первого начала термодинамики**).

ПЕРВОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ, ПРИМЕНЕНИЕ К ИЗОПРОЦЕССАМ

Процесс	Изотермическое расширение	Изотермическое сжатие	Изохорное нагревание	Изохорное охлаждение	Изобарное расширение	Изобарное сжатие
Условие процесса	$T = \text{const}$	$T = \text{const}$	$V = \text{const}$	$V = \text{const}$	$p = \text{const}$	$p = \text{const}$
$p - V$ -диаграмма						
Первое начало термодинамики ($Q = \Delta U + A$) применительно к изопроцессу	$Q = A$ ($Q > 0$)	$Q = A$ ($Q < 0$)	$Q = \Delta U$ ($Q > 0$)	$Q = \Delta U$ ($Q < 0$)	$Q = \Delta U + A$ ($Q > 0$)	$Q = \Delta U + A$ ($Q < 0$)
Изменение внутренней энергии ΔU	0	0	$\Delta U = Q$ ($\Delta U > 0$)	$\Delta U = Q$ ($\Delta U < 0$)	$\Delta U = Q - A$ ($\Delta U > 0$)	$\Delta U = Q - A$ ($\Delta U < 0$)
Работа A	$A > 0$ определяется площадью закрашенной фигуры	$A < 0$ определяется площадью закрашенной фигуры	0	0	$p(V_2 - V_1) = \frac{m}{M} R(T_2 - T_1)$ ($A > 0$) определяется площадью закрашенного прямоугольника	$p(V_2 - V_1) = \frac{m}{M} R(T_2 - T_1)$ ($A < 0$) определяется площадью закрашенного прямоугольника

ПЛАВЛЕНИЕ — переход вещества из кристаллического (твердого) состояния в жидкое. Плавление происходит при определенной температуре (точке) плавления, которая возрастает с увеличением внешнего давления.

Если твердое тело нагревать, то его *внутренняя энергия*, складывающаяся из энергии колебаний частиц в узлах решетки и энергии взаимодействия этих частиц, возрастает. При повышении температуры амплитуда колебаний частиц увеличивается до тех пор, пока кристаллическая решетка не разрушится, — твердое тело плавится.

На рис. 57 изображена примерная зависимость $T(Q)$, где Q — количество теплоты, получаемое телом при плавлении. По мере сообщения твердому телу теплоты его температура повышается, а при температуре плавления $T_{\text{пл}}$ начинается переход тела из твердого состояния в жидкое. Температура $T_{\text{пл}}$ остается постоянной до тех пор, пока весь кристалл не расплавится, и только тогда температура жидкости вновь начнет повышаться.

Нагревание твердого тела до $T_{\text{пл}}$ еще не переводит его в жидкое состояние, поскольку энергия частиц вещества должна быть достаточной для разрушения кристаллической решетки. В процессе плавления теплота, сообщаемая веществу, идет на совершение работы по разрушению кристаллической решетки, а поэтому $T_{\text{пл}} = \text{const}$ до расплавления всего кристалла. Затем подводимая теплота пойдет опять-таки на увеличение энергии частиц жидкости, и ее температура начнет повышаться.

ПЛАЗМА, СВОЙСТВА. Плазма — сильно ионизированный газ, в котором концентрации положительных и отрицательных зарядов практически одинаковы. Различают **высокотемпературную плазму**, возникающую при сверхвысоких температурах, и **газоразрядную плазму**, возникающую при газовом разряде. Плазма характеризуется **степенью ионизации** α — отношением числа ионизированных частиц к полному их числу в единице

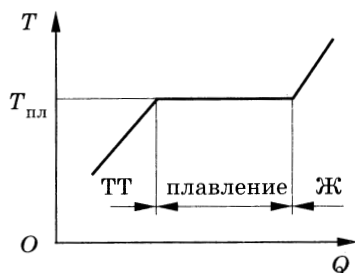


Рис. 57

объема плазмы. В зависимости от величины α говорят о **слабо** (α составляет доли процента), **умеренно** (α — несколько процентов) и **полностью** (α близко к 100%) **ионизированной плазме**.

Плазма обладает следующими основными свойствами: высокой степенью ионизации газа, в пределе — полной ионизацией; равенством нулю результирующего пространственного заряда (концентрация положительных и отрицательных частиц в плазме практически одинакова); большой электропроводностью, причем ток в плазме создается в основном электронами, как наиболее подвижными частицами; свечением; сильным взаимодействием с электрическим и магнитным полями; колебаниями электронов в плазме с большой частотой ($\approx 10^8$ Гц), вызывающими общее вибрационное состояние плазмы; «коллективным» — одновременным взаимодействием громадного числа частиц (в обычных газах частицы взаимодействуют друг с другом попарно). Эти свойства определяют качественное своеобразие плазмы, позволяющее считать ее *особым, четвертым, состоянием вещества*.

Высокотемпературная плазма ($T \approx 10^6$ — 10^8 К) из смеси дейтерия и трития исследуется в связи с открывающейся принципиальной возможностью осуществления управляемого термоядерного синтеза. Низкотемпературная плазма ($T \leq 10^5$ К) используется в газových лазерах, плазменных ракетных двигателях, весьма перспективных для длительных космических полетов.

В состоянии плазмы находятся, например, звезды, звездные атмосферы, радиационные пояса Земли, Солнце. Их температура достигает десятков миллиардов градусов.

ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ. Суммарная энергия частиц жидкости складывается из энергии их хаотического (теплового) движения и потенциальной энергии, обусловленной силами межмолекулярного взаимодействия. Для перемещения молекулы из глубины жидкости в поверхностный слой надо затратить работу. Эта работа совершается за счет кинетической энергии молекул и идет на увеличение их потенциальной энергии. Поэтому молекулы поверхностного слоя жидкости обладают большей потенциальной энергией, чем молекулы внутри

жидкости. Эта дополнительная энергия, которой обладают молекулы в поверхностном слое жидкости, называется **поверхностной энергией**.

Так как равновесное состояние характеризуется минимумом потенциальной энергии, то жидкость при отсутствии внешних сил будет принимать такую форму, чтобы при заданном объеме она имела минимальную поверхность, т. е. форму шара. Наблюдая мельчайшие капельки, взвешенные в воздухе, можем видеть, что они действительно имеют форму шариков, но несколько искаженную из-за действия сил земного тяготения. В условиях невесомости капля любой жидкости (независимо от ее размеров) имеет сферическую форму, что доказано в ходе экспериментов при космических полетах.

Сила поверхностного натяжения — это сила, направленная по касательной к поверхности жидкости и перпендикулярно участку контура, на который она действует, и стремящаяся сократить поверхность до минимума.

Поверхностное натяжение определяется силой поверхностного натяжения, приходящейся на единицу длины контура, ограничивающего поверхность:

$$\sigma = \frac{F}{l},$$

где l — длина контура, ограничивающего поверхность жидкости.

Единица поверхностного натяжения — **ньютон на метр** (Н/м): 1 Н/м равен поверхностному натяжению жидкости, создаваемому силой в 1 Н, приложенной к участку контура свободной поверхности длиной 1 м и действующей нормально к контуру и по касательной к поверхности.

Большинство жидкостей при температуре 300 К имеет поверхностное натяжение порядка 10^{-2} — 10^{-1} Н/м. Поверхностное натяжение с повышением температуры уменьшается, так как увеличиваются средние расстояния между молекулами жидкости.

Поверхностное натяжение существенным образом зависит от примесей, имеющих в жидкостях. **Вещества**, ослабляющие поверхностное натяжение жидкости, называются **поверхностно-активными**. Наиболее известным поверхностно-актив-

ным веществом по отношению к воде является мыло. Оно сильно уменьшает ее поверхностное натяжение (примерно с $7,5 \cdot 10^{-2}$ до $4,5 \cdot 10^{-2}$ Н/м). Поверхностно-активными веществами, понижающими поверхностное натяжение воды, являются также спирты, эфиры, нефть и др.

Существуют вещества (сахар, соль), которые увеличивают поверхностное натяжение жидкости благодаря тому, что их молекулы взаимодействуют с молекулами жидкости сильнее, чем молекулы жидкости между собой. Например, если посолить мыльный раствор, то в поверхностный слой жидкости выталкивается молекул мыла больше, чем в пресной воде. В мыловаренной технике мыло «высаливается» этим способом из раствора.

ПОЛИМЕРЫ — органические аморфные тела, молекулы которых состоят из большого числа одинаковых длинных молекулярных цепочек, соединенных химическими (валентными) связями. К полимерам относятся как естественные (крахмал, белок, каучук, клетчатка и др.), так и искусственные (пластмасса, резина, полистирол, лавсан, капрон и др.) органические вещества. Полимерам присущи прочность и эластичность; некоторые полимеры выдерживают растяжение, в 5—10 раз превышающее их первоначальную длину. Это объясняется тем, что длинные молекулярные цепочки могут при деформации либо сворачиваться в плотные клубки, либо вытягиваться в прямые линии. Эластичность полимеров проявляется только в определенном интервале температур, ниже которого они становятся твердыми и хрупкими, а выше — пластичными.

ПУАССОНА УРАВНЕНИЕ (УРАВНЕНИЕ АДИАБАТНОГО ПРОЦЕССА):

$$pV^\gamma = \text{const}, \quad (1)$$

где γ — показатель адиабаты (безразмерная величина).

$$\gamma = \frac{C_p}{C_V} = \frac{c_p}{c_V} = \frac{i+2}{i},$$

где C_p и c_p , C_V и c_V — соответственно молярные и удельные теплоемкости при постоянном

давлении и объеме, i — число степеней свободы молекул.

Применяя уравнение Клапейрона—Менделеева $pV = \frac{m}{M}RT$, можно перейти к переменным T , V или p , T в уравнении Пуассона.

Исключив из уравнения (1) давление или объем, соответственно получим:

$$TV^{\gamma-1} = \text{const}, \quad T^{\gamma}p^{1-\gamma} = \text{const}. \quad (2)$$

Выражения (1)—(2) представляют собой уравнения адиабатного процесса.

РАБОТА ГАЗА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ЕГО ОБЪЕМА. При расширении газа происходит перемещение поршня на расстояние Δl (рис. 58), при этом газ совершает работу:

$$\Delta A = F \Delta l = pS \Delta l = p\Delta V.$$

Работа расширения газа положительна ($\Delta V > 0$), работа сжатия — отрицательна ($\Delta V < 0$).

Формула

$$\Delta A = p\Delta V$$

справедлива при любом изменении объема твердых, жидких и газообразных тел.

Произведенную при расширении газа работу можно определить графически.

Пусть изменение давления газа при его расширении задается произвольной кривой (рис. 59). При увеличении объема на

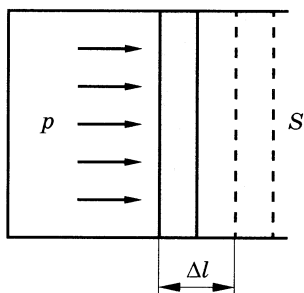


Рис. 58

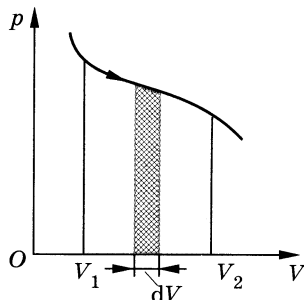


Рис. 59

ΔV совершаемая газом работа равна $p \Delta V$, т. е. определяется площадью закрашенной полоски. Полная работа, которую совершает газ при расширении от объема V_1 до объема V_2 , определяется площадью, ограниченной осью абсцисс, кривой $p(V)$ и прямыми V_1 и V_2 .

РАБОЧЕЕ ТЕЛО — тело, совершающее круговой процесс и обменивающееся энергией с другими телами.

РЕАЛЬНЫЙ ГАЗ — газ, свойства которого зависят от взаимодействия молекул. Модель и д е а л ь н о г о г а з а позволяет описывать поведение разреженных реальных газов при достаточно высоких температурах и низких давлениях. При выводе уравнения состояния идеального газа размерами молекул и их взаимодействием друг с другом пренебрегают. Повышение давления приводит к уменьшению среднего расстояния между молекулами, поэтому необходимо учитывать объем молекул и взаимодействие между ними. Так, в 1 м^3 газа при нормальных условиях содержится $2,68 \cdot 10^{25}$ молекул, занимающих объем примерно 10^{-4} м^3 (радиус молекулы примерно 10^{-10} м), которым по сравнению с объемом газа (1 м^3) можно пренебречь. При давлении 500 МПа ($1 \text{ атм} = 101,3 \text{ кПа}$) объем молекул составит уже половину всего объема газа. Таким образом, при высоких давлениях и низких температурах указанная модель идеального газа непригодна.

В случае реальных газов следует учитывать **силы межмолекулярного взаимодействия**. Они проявляются на расстояниях $\leq 10^{-9} \text{ м}$ и быстро убывают при увеличении расстояния между молекулами. Такие силы называются **короткодействующими**. На рис. 60 приведена качественная зависимость сил межмолекулярного взаимодействия от расстояния r между

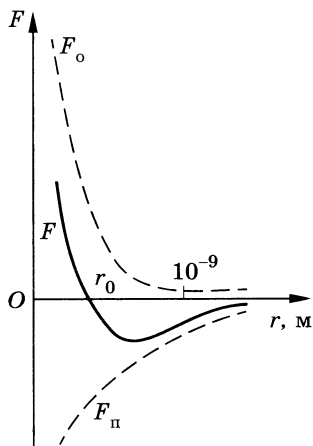


Рис. 60

молекулами, где F_0 и $F_{\text{п}}$ — соответственно силы отталкивания и притяжения, а F — их результирующая. Силы отталкивания считаются *положительными*, а силы взаимного притяжения — *отрицательными*.

На расстоянии $r = r_0$ результирующая сила $F = 0$, т. е. силы притяжения и отталкивания уравновешивают друг друга. Таким образом, расстояние r_0 соответствует равновесному расстоянию между молекулами, на котором бы они находились в отсутствие теплового движения. При $r < r_0$ преобладают силы отталкивания ($F > 0$), при $r > r_0$ — силы притяжения ($F < 0$). На расстояниях $r > 10^{-9}$ м межмолекулярные силы взаимодействия практически отсутствуют ($F \rightarrow 0$).

РЕНТГЕНОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ — методы исследования структуры вещества по интенсивности и распределению в пространстве рассеянного на анализируемом веществе рентгеновского излучения.

РЕПЕРНЫЕ ТОЧКИ — первичные воспроизводимые температурные точки, каждой из которых присвоена определенная температура. На реперных точках построены *температурные шкалы*: *Международная практическая и термодинамическая*.

СМАЧИВАНИЕ — искривление свободной поверхности жидкости при соприкосновении жидкости с поверхностью твердого тела. Из практики известно, что капля воды растекается на стекле и принимает форму, изображенную на рис. 61, *а*, в то время как ртуть на той же поверхности превращается в несколько сплюснутую каплю (рис. 61, *б*). В первом случае говорят, что жидкость *смачивает* твердую поверхность, во втором — *не смачивает* ее. Смачивание зависит от характера сил, действующих между молекулами поверхностных слоев соприкасающихся сред. Для смачивающей жидкости силы притяжения между молекулами жидкости и твердого тела больше, чем между молекулами самой жидкости, и жидкость стремится увеличить поверхность соприкосновения с твердым телом. Для не смачивающей жидкости силы притяжения между молекулами

жидкости и твердого тела меньше, чем между молекулами жидкости, и жидкость стремится уменьшить поверхность своего соприкосновения с твердым телом.

Явление смачивания характеризуется **краевым углом** θ — угол между касательными к поверхности жидкости и твердого тела. Жидкость *смачивает* твердое тело, если *краевой угол острый*: $0 \leq \theta < \pi/2$ (см. рис. 61, а), жидкость *не смачивает* твердое тело, если *краевой угол тупой*: $\pi/2 < \theta < \pi$ (см. рис. 61, б). При $\theta = 0$ имеем дело с *полным смачиванием*, при $\theta = \pi$ — с *полным несмачиванием*.

Смачивание и несмачивание являются понятиями относительными, т. е. жидкость, смачивающая одну твердую поверхность, не смачивает другую. Например, вода смачивает стекло, но не смачивает парафин; ртуть не смачивает стекло, но смачивает чистые поверхности металлов.

Явления смачивания и несмачивания имеют большое значение в технике. Например, в методе флотационного обогащения руды (отделение руды от пустой породы) ее, мелко раздробленную, взбалтывают в жидкости, смачивающей пустую породу и не смачивающей руду. Через эту смесь продувается воздух, а затем она отстаивается. При этом смоченные жидкостью частицы породы опускаются на дно, а крупинки минералов «прилипают» к пузырькам воздуха и всплывают на поверхность жидкости. При механической обработке металлов их смачивают специальными жидкостями, что облегчает и ускоряет обработку.

СРЕДНЯЯ КВАДРАТИЧНАЯ СКОРОСТЬ (см. также Основное уравнение молекулярно-кинетической теории). Рассмотрим основное уравнение молекулярно-кинетической теории в виде

$$pV = \frac{1}{3} m \langle v_{\text{КВ}} \rangle^2.$$

Для 1 моль газа $m = M$ (M — молярная масса), поэтому

$$pV_M = \frac{1}{3} M \langle v_{\text{КВ}} \rangle^2,$$

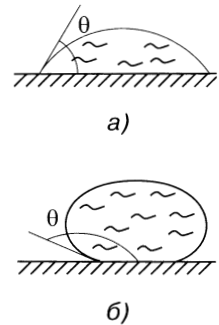


Рис. 61

где V_M — молярный объем. По уравнению Клапейрона—Менделеева для 1 моль газа

$$pV_M = RT.$$

Приравнивая правые части двух последних уравнений, получим выражение для средней квадратичной скорости:

$$\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\frac{3RT}{M}}.$$

Учитывая, что $R = kN_A$ и $M = m_0N_A$ (k — постоянная Больцмана, N_A — постоянная Авогадро, m_0 — масса одной молекулы), формулу для средней квадратичной скорости можно записать в виде:

$$\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\frac{3RT}{M}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}.$$

По этой формуле можно рассчитать, что при комнатной температуре молекулы кислорода имеют среднюю квадратичную скорость 480 м/с, водорода — 1900 м/с. При температуре жидкого гелия те же скорости будут соответственно 40 и 160 м/с.

СРЕДНЯЯ КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ МОЛЕКУЛЫ. В состоянии термодинамического равновесия на каждую поступательную и вращательную степень свободы приходится кинетическая энергия, равная $\frac{kT}{2}$. Тогда **средняя кинетическая энергия молекулы**

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{i}{2} kT, \quad (1)$$

где i — число степеней свободы молекулы, k — постоянная Больцмана.

В случае одноатомного идеального газа ($i = 3$) средняя кинетическая энергия поступательного движения одной молекулы

$$\langle \varepsilon_0 \rangle = \frac{3}{2} kT. \quad (2)$$

Из этого уравнения следует, что при $T = 0$ $\langle \varepsilon_0 \rangle = 0$, т. е. при 0 К прекращается поступательное движение молекул газа,

а следовательно, его давление равно нулю. Таким образом, *термодинамическая температура является мерой средней кинетической энергии поступательного движения молекул идеального газа*, и формула (2) дает молекулярно-кинетическое толкование понятию температуры.

ТВЕРДОЕ ТЕЛО — агрегатное состояние вещества, характеризующееся постоянством формы и объема, причем тепловые движения частиц в нем представляют собой хаотические колебания частиц относительно положений равновесия. Твердые тела делятся на две группы: *аморфные* и *кристаллические*.

Аморфное тело — твердое тело, физические свойства которого одинаковы по всем направлениям (наблюдается **изотропия** свойств). Для аморфных тел, как и для жидкостей, характерен *ближний порядок* в расположении частиц, но в отличие от жидкостей подвижность частиц довольно мала. Особенностью аморфных тел является отсутствие у них определенной точки плавления, т. е. невозможно указать определенную температуру, выше которой можно было бы констатировать жидкое состояние, а ниже — твердое. Из опыта известно, что в аморфных телах со временем может наблюдаться процесс кристаллизации, например в стекле появляются кристаллики; оно, теряя прозрачность, начинает мутнеть и превращаться в поликристаллическое тело.

Кристаллическое тело (кристалл) — твердое тело, имеющее упорядоченное, периодически повторяющееся расположение частиц (атомов, молекул, ионов). Структура, для которой характерно регулярное расположение частиц с периодической повторяемостью в трех измерениях, называется **кристаллической решеткой**. Точки, в которых расположены частицы, а точнее — средние равновесные положения, около которых частицы совершают колебания, называются **узлами кристаллической решетки**. Кристаллы, в свою очередь, можно разделить на две группы — *монокристаллы* и *поликристаллы*.

Монокристалл — твердое тело, частицы которого образуют единую кристаллическую решетку. Кристаллическая структура монокристаллов обнаруживается по их внешней форме. Хотя внешняя форма монокристаллов одного типа может быть

различной, но углы между соответствующими гранями у них остаются постоянными. Это **закон постоянства углов**, сформулированный М. В. Ломоносовым. Для монокристаллов характерна **анизотропия** — зависимость физических свойств — упругих, механических, тепловых, электрических, магнитных, оптических — от направления. Анизотропия монокристаллов объясняется тем, что в кристаллической решетке различно число частиц, приходящихся на одинаковые по длине, но разные по направлению отрезки (рис. 62), т. е. плотность расположения частиц кристаллической решетки по разным направлениям неодинакова, что и приводит к различию свойств кристалла вдоль этих направлений.

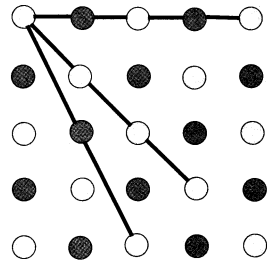


Рис. 62

Поликристалл — твердое тело, имеющее мелкокристаллическую структуру, т. е. состоящее из множества беспорядочно ориентированных кристаллических зерен (например, горные породы, металлы, сплавы). В поликристаллах анизотропия наблюдается только для отдельных мелких кристалликов, но их различная ориентация приводит к тому, что свойства поликристалла по всем направлениям в *среднем* одинаковы, т. е. для поликристаллов характерна **изотропия**.

ТЕМПЕРАТУРА — физическая величина, характеризующая состояние термодинамического равновесия макроскопической системы.

Единица температуры — **кельвин (К)** (см. Единицы физических величин).

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ШКАЛЫ — в соответствии с решением XI Генеральной конференции по мерам и весам (1968) применяются только две температурные шкалы:

Международная практическая (градуируется в градусах Цельсия ($^{\circ}\text{C}$)): в ней температура замерзания и кипения воды при давлении $1,013 \cdot 10^5$ Па равна соответственно 0 и 100°C (*реперные точки*);

термодинамическая (градуируется в кельвинах (К)): определяется по одной реперной точке — **тройной точке во-**

ды — температуре, при которой лед, вода и насыщенный пар при давлении 609 Па находятся в термодинамическом равновесии. Температура этой точки по термодинамической шкале равна 273,16 К (точно), а температура замерзания воды при том же давлении, что и в Международной практической шкале, равна 273,15 К. Термодинамическая температура и температура по Международной практической шкале связаны соотношением:

$$T = 273,15 + t.$$

Обычно при расчетах используется формула

$$T = 273 + t.$$

Температура $T = 0$ называется **нулем кельвина**. Анализ различных процессов показывает, что 0 К недостижим, хотя приближение к нему сколь угодно близко возможно.

ТЕПЛОВОЙ ДВИГАТЕЛЬ — периодически действующий двигатель, совершающий работу за счет полученной извне теплоты. В тепловых двигателях используется прямой цикл. Принцип действия теплового двигателя рассмотрен на рис. 63. От термостата с более высокой температурой T_1 , называемого **нагревателем (Н)**, за цикл отнимается количество теплоты Q_1 , а термостату с более низкой температурой T_2 , называемому **холодильником (Х)**, за цикл передается количество теплоты Q_2 , при этом совершается работа $A = Q_1 - Q_2$.

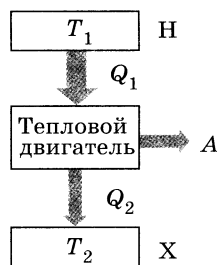


Рис. 63

Термический коэффициент полезного действия теплового двигателя $\eta = (Q_1 - Q_2)/Q_1$ (см. **Круговой процесс (цикл)**). Чтобы $\eta = 1$, должно быть выполнено условие: $Q_2 = 0$, т. е. тепловой двигатель должен иметь один источник теплоты, а это невозможно. Так, французский физик и инженер Карно показал, что для работы теплового двигателя необходимо не менее двух источников теплоты с различными температурами, иначе это противоречило бы второму началу термодинамики.

ТЕПЛОЕМКОСТЬ — физическая величина, численно равная отношению количества теплоты ΔQ , сообщаемого телу, к изменению температуры ΔT тела в термодинамическом процессе:

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta T}.$$

Единица теплоемкости — **джоуль на кельвин** (Дж/К): 1 Дж/К равен теплоемкости системы, температура которой повышается на 1 К при сообщении ей количества теплоты 1 Дж.

Молярная теплоемкость — величина, равная количеству теплоты, необходимому для нагревания 1 моль вещества на 1 К.

$$C_M = \frac{Q}{\nu \Delta T}.$$

Единица молярной теплоемкости — **джоуль на моль-кельвин** [Дж/(моль · К)]: 1 Дж/(моль · К) равен молярной теплоемкости вещества, имеющего при количестве вещества 1 моль теплоемкость 1 Дж/К.

Удельная теплоемкость — величина, равная количеству теплоты, необходимому для нагревания 1 кг вещества на 1 К:

$$c = \frac{Q}{m \Delta T}.$$

Единица удельной теплоемкости — **джоуль на килограмм-кельвин** [Дж/(кг · К)]: 1 Дж/(кг · К) равен удельной теплоемкости вещества, имеющего при массе 1 кг теплоемкость 1 Дж/К.

Удельная теплоемкость связана с молярной соотношением

$$C_M = cM,$$

где M — молярная масса вещества.

Теплоемкости (удельную и молярную) различают при **постоянном объеме** (c_V и C_V) и **постоянном давлении** (c_p и C_p), если в процессе нагревания вещества его объем или давление поддерживаются постоянными. Молярная теплоемкость при постоянном объеме $C_V = \frac{i}{2} R$, при постоянном давлении $C_p = (i + 2) \frac{R}{2}$ (i — число степеней свободы, R — молярная газовая постоянная).

Газ	i	C_V	C_p
Одноатомный	3	$\frac{3}{2}R$	$\frac{5}{2}R$
Двухатомный	5	$\frac{5}{2}R$	$\frac{7}{2}R$
Трехатомный	6	$3R$	$4R$

Молярные теплоемкости при постоянном давлении и объеме связаны **уравнением Майера**:

$$C_p = C_V + R.$$

Из уравнения видно, что C_p всегда больше C_V на величину молярной газовой постоянной. Это объясняется тем, что при нагревании газа при постоянном давлении требуется еще дополнительное количество теплоты на совершение работы расширения газа, поскольку постоянство давления обеспечивается увеличением объема газа.

ТЕПЛООБМЕН — самопроизвольный необратимый процесс передачи энергии от более нагретых тел (или участков тела) к менее нагретым *без совершения работы*. Если несколько тел с различными температурами привести в соприкосновение, то между ними совершается теплообмен (*за счет обмена энергиями хаотически движущихся молекул*), в результате которого происходит выравнивание температур.

Теплообмен осуществляется путем *теплопроводности, конвекции и температурным излучением (поглощением)*.

Теплопроводность — передача энергии от более нагретых частей тела к менее нагретым, приводящая к выравниванию температур. В процессе теплопроводности энергия атомов и молекул более нагретых участков вещества передается соседним, более холодным. С течением времени, вследствие столкновения молекул, происходит выравнивание их средних кинетических энергий, а значит, и температуры.

Конвекция — обмен энергией между движущимися неравномерно нагретыми частями газов или жидкостей. Ее интенсивность зависит от разности температур между слоями и вязкости среды.

Температурное излучение (поглощение) — передача энергии без непосредственного контакта тел, обменивающихся энергией. Заключается в испускании (поглощении) телами электромагнитных волн. Происходит в газах и вакууме. Температурное излучение — универсальный вид теплообмена, наблюдающийся всегда при наличии разности температур между любыми телами и внутри каждого тела.

Рассмотрим систему тел, в которой происходит теплообмен. Согласно определению, $A = 0$. Тогда из первого начала термодинамики $Q = \Delta U + A$ получаем $Q = \Delta U$. В процессе теплообмена внутренняя энергия одних тел увеличивается, других — уменьшается. Мера этого изменения — количество теплоты, которое данные тела получили или отдали в процессе теплообмена. В общем случае

$$Q = \sum_{i=1}^n \Delta U_i,$$

где n — число тел, участвующих в теплообмене.

Если в теплообмене участвуют несколько тел, то алгебраическая сумма количества теплоты, отданного телами, —

$$\sum_{i=1}^n Q_{i_{\text{отд}}},$$

и количества теплоты, полученного телами, —

$$\sum_{k=1}^n Q_{k_{\text{пол}}},$$

для замкнутой системы тел равна нулю:

$$\sum_{i=1}^n Q_{i_{\text{отд}}} + \sum_{k=1}^n Q_{k_{\text{пол}}} = 0.$$

Это положение называется **уравнением теплового баланса**.

Расчет изменения внутренней энергии тела массой m при теплообмене

Процесс	Формула	Примечания
Нагревание или охлаждение	$\Delta U = cm \Delta T$	c — удельная теплоемкость тела, $\Delta T = \theta - T_0$ (θ и T_0 — соответственно конечная и начальная температура тела)
Плавление или кристаллизация	$\Delta U = \pm \lambda m$	λ — удельная теплота плавления
Парообразование или конденсация	$\Delta U = \pm rm$	r — удельная теплота парообразования

ТЕРМОДИНАМИКА — раздел физики, в котором изучаются общие свойства макроскопических систем, находящихся в состоянии термодинамического равновесия, и процессы перехода между этими состояниями. Процессы в термодинамике изучаются с помощью **термодинамического метода** — метода исследования систем из большого числа частиц, оперирующего на основе законов превращения энергии величинами, характеризующими систему в целом (например, давление, объем, температура), не рассматривая ее микроструктуры и совершающихся в системе микропроцессов.

Область применения термодинамики значительно шире, чем молекулярно-кинетической теории, ибо нет таких областей физики и химии, в которых нельзя было бы пользоваться термодинамическим методом. Однако, с другой стороны, термодинамический метод несколько ограничен: термодинамика ничего не говорит о микроскопическом строении вещества, о механизме явлений, а лишь устанавливает связи между макроскопическими параметрами системы. Молекулярно-кинетическая теория и термодинамика взаимно дополняют друг друга, образуя единое целое, но отличаются различными методами исследования.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА — совокупность макроскопических тел, которые взаимодействуют и обмениваются энергией как между собой, так и с другими телами (внешней средой).

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ (ПАРАМЕТРЫ СОСТОЯНИЯ) — совокупность физических величин, характеризующих свойства термодинамической системы. Обычно в качестве параметров состояния используются температура, давление и удельный объем.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС — любое изменение в термодинамической системе, связанное с изменением хотя бы одного ее термодинамического параметра.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ РАВНОВЕСИЕ — равновесие макроскопической системы, характеризующееся при постоянных внешних условиях неизменностью термодинамических параметров.

ТЕРМОСТАТ — термодинамическая система, которая может обмениваться теплотой с телами без изменения температуры.

ТОЧКА РОСЫ — температура, при которой находящийся в воздухе водяной пар становится насыщенным. Если известна температура воздуха, то, определив точку росы, можно рассчитать влажность воздуха (используя таблицы давления насыщенного водяного пара при различных температурах). При достижении точки росы в воздухе на предметах начинают конденсироваться водяные пары.

УДЕЛЬНАЯ ТЕПЛОТА ПАРООБРАЗОВАНИЯ r — физическая величина, равная количеству теплоты, необходимому для превращения в пар 1 кг жидкости, нагретой до температуры кипения. При обратном процессе — **к о н д е н с а ц и и** — при превращении 1 кг пара в жидкость, согласно закону сохранения энергии, выделяется количество теплоты r .

Единица — джоуль на килограмм (Дж/кг).

УДЕЛЬНАЯ ТЕПЛОТА ПЛАВЛЕНИЯ λ — физическая величина, равная количеству теплоты, необходимому для перехода 1 кг твердого тела в жидкое состояние при температуре плавления. При обратном процессе — **к р и с т а л л и з а ц и и** — при превращении 1 кг жидкости в твердое тело, согласно закону сохранения энергии, выделяется количество теплоты λ .

Единица — джоуль на килограмм (Дж/кг).

УДЕЛЬНЫЙ ОБЪЕМ — объем единицы массы. Если тело однородно, т. е. его плотность $\rho = \text{const}$, то удельный объем $v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho}$. Так как при постоянной массе удельный объем пропорционален общему объему, то макроскопические свойства однородного тела характеризуют объемом тела.

УПРУГОСТЬ — свойство тел восстанавливать свою форму, размеры и объем после прекращения действия внешних сил, вызывающих деформацию (см. У п р у г а я д е ф о р м а ц и я).

УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА — уравнение, связывающее параметры состояния идеального газа.

Для 1 моль газа:

$$pV_M = RT. \quad (1)$$

Это уравнение называется также **уравнением Клапейрона—Менделеева для 1 моль газа**.

Для произвольной массы газа:

$$pV = \frac{m}{M} RT$$

или $pV = \nu RT$ — **уравнение Клапейрона—Менделеева для произвольной массы газа**.

В приведенных уравнениях p — давление, V_M — молярный объем, R — молярная газовая постоянная, T — температура, m — масса газа, M — молярная масса газа, $\nu = m/M$ — количество вещества.

Используя постоянную Больцмана $k = R/N_A$, уравнение (1) запишем в виде

$$p = RT/V_M = kN_A T/V_M = nkT,$$

где $N_A/V_M = n$ — концентрация молекул (число молекул в единице объема). Уравнение

$$p = nkT$$

является также **уравнением состояния идеального газа**. Из него следует, что давление идеального газа при данной темпе-

ратуре прямо пропорционально концентрации его молекул (или плотности газа).

УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ РЕАЛЬНОГО ГАЗА (УРАВНЕНИЕ ВАН-ДЕР-ВААЛЬСА). Ван-дер-Ваальс в уравнение Клапейрона—Менделеева $pV_M = RT$, описывающее поведение 1 моль идеального газа, ввел две поправки.

1. **Учет собственного объема молекул.** Наличие сил отталкивания, которые противодействуют проникновению в занятый молекулой объем других молекул, приводит к тому, что фактический свободный объем, в котором могут двигаться молекулы реального газа, будет не V_M , а $V_M - b$, где b — объем, занимаемый самими молекулами. Объем b равен *четверенному собственному объему молекул*. Если, например, в сосуде находятся две молекулы, то центр любой из них не может приблизиться к центру другой молекулы на расстояние, меньшее диаметра d молекулы. Это означает, что для центров обеих молекул оказывается недоступным сферический объем радиуса d , т. е. объем, равный восьми объемам молекулы или четверенному объему молекулы в расчете на одну молекулу.

2. **Учет притяжения молекул.** Действие сил притяжения газа приводит к появлению дополнительного давления на газ, называемого **внутренним давлением**. По вычислениям Ван-дер-Ваальса, внутреннее давление обратно пропорционально квадрату молярного объема, т. е.

$$p' = a/V_M^2,$$

где a — постоянная Ван-дер-Ваальса, характеризующая силы межмолекулярного притяжения, V_M — молярный объем.

Вводя эти поправки, получим **уравнение Ван-дер-Ваальса для моля газа (уравнение состояния реальных газов):**

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

Поправки a и b — постоянные для каждого газа величины, определяемые опытным путем (записываются уравнения Ван-дер-Ваальса для двух известных из опыта состояний газа и решаются относительно a и b).

При выводе уравнения Ван-дер-Ваальса сделан целый ряд упрощений, поэтому оно также весьма приближенное, хотя и лучше (особенно для несильно сжатых газов) согласуется с опытом, чем уравнение состояния идеального газа. Уравнение Ван-дер-Ваальса не единственное уравнение, описывающее реальные газы. Существуют и другие уравнения, некоторые из них даже точнее описывают реальные газы, но не рассматриваются из-за их сложности.

ФАЗА — это термодинамически равновесное состояние вещества, отличающееся по физическим свойствам от других возможных равновесных состояний того же вещества. Если, например, в закрытом сосуде находится вода, то эта система является *двухфазной*: жидкая фаза — вода; газообразная фаза — смесь воздуха с водяными парами. Если в воду бросить кусочки льда, то эта система станет трехфазной, в которой лед является твердой фазой. Часто понятие «фаза» употребляется в смысле агрегатного состояния, однако надо учитывать, что оно шире, чем понятие «агрегатное состояние». В пределах одного агрегатного состояния вещество может находиться в нескольких фазах, отличающихся по своим свойствам, составу и строению (лед, например, встречается в пяти различных модификациях — фазах). Если же система является однокомпонентной, т. е. состоящей из химически однородного вещества или его соединения, то *понятие фазы совпадает с понятием агрегатного состояния*.

ФАЗОВЫЙ ПЕРЕХОД — переход из одной фазы в другую. Фазовый переход всегда связан с качественными изменениями свойств вещества. Примером фазового перехода могут служить изменения агрегатного состояния вещества или переходы, связанные с изменениями в составе, строении и свойствах вещества (например, переход кристаллического вещества из одной модификации в другую). Различают фазовые переходы двух родов.

Фазовый переход I рода — фазовый переход, сопровождающийся поглощением или выделением теплоты (например, плавление, кристаллизация): фазовые переходы I рода характеризуются постоянством температуры. Объяснение этому яв-

лению можно дать следующим образом. Например, при плавлении телу нужно сообщить некоторое количество теплоты, чтобы вызвать разрушение кристаллической решетки. Подводимая при плавлении теплота идет не на нагрев тела, а на разрыв межатомных связей, поэтому плавление протекает при постоянной температуре.

Фазовый переход II рода — фазовый переход, не связанный с поглощением или выделением теплоты и изменением объема. Такой переход характеризуется скачкообразным изменением теплоемкости. Примеры фазовых переходов II рода: переход ферромагнитных веществ (Fe, Ni) при определенном давлении и температуре в парамагнитное состояние; переход металлов и некоторых сплавов при температуре, близкой к 0 К, в сверхпроводящее состояние, характеризующееся скачкообразным уменьшением электрического сопротивления до нуля; превращение обыкновенного жидкого гелия (гелия I) при $T = 2,9 \text{ К}$ в другую жидкую модификацию (гелий II), обладающую свойствами сверхтекучести.

ФИЗИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ В МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ.

В молекулярно-кинетической теории пользуются *идеализированной моделью идеального газа*, согласно которой считают, что:

- 1) собственный объем молекул газа пренебрежимо мал по сравнению с объемом сосуда;
- 2) между молекулами газа отсутствуют силы взаимодействия;
- 3) столкновения молекул газа между собой и со стенками сосуда абсолютно упругие.

Модель идеального газа можно использовать при изучении реальных газов, так как они в условиях, близких к нормальным (например, кислород и гелий), а также при низких давлениях и высоких температурах близки по свойствам к идеальному газу. Кроме того, внося поправки, учитывающие собственный объем молекул газа и действующие молекулярные силы, можно перейти к теории реальных газов. Процессы в идеальных газах описываются законами Бойля—Мариотта, Гей-Люссака, Шарля, Авогадро, Дальтона.

ФУНКЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МОЛЕКУЛ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА ПО СКОРОСТЯМ. По молекулярно-кинетической теории, как бы ни изменялись скорости молекул при столкновениях, средняя квадратичная скорость молекул массой m_0 в газе, находящемся в состоянии равновесия при $T = \text{const}$, остается постоянной и равной $\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{3kT/m_0}$. Это объясняется тем, что в газе, находящемся в состоянии равновесия, устанавливается некоторое стационарное, не меняющееся со временем распределение молекул по скоростям, которое подчиняется вполне определенному *статистическому* закону. Этот закон теоретически выведен Дж. Максвеллом. Максвелл предположил:

1. Газ состоит из большого числа N одинаковых молекул.
2. Температура газа постоянна.
3. Молекулы газа совершают тепловое хаотическое движение.
4. На газ не действуют силовые поля.

Закон Максвелла описывается некоторой функцией $f(v)$, называемой **функцией распределения молекул по скоростям**. Если разбить диапазон скоростей молекул на малые интервалы, равные Δv , то на каждый интервал скорости будет приходиться некоторое число молекул $\Delta N(v)$, имеющих скорость, заключенную в этом интервале. Функция $f(v)$ *определяет относительное число молекул $\Delta N(v)/N$, скорости которых лежат в интервале от v до $v + \Delta v$, т. е.*

$$f(v) = \frac{\Delta N(v)}{N \Delta v}.$$

График функции распределения молекул по скоростям представлен на рис. 64. Относительное число молекул $\frac{\Delta N(v)}{N}$,

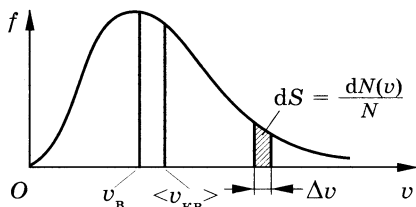


Рис. 64

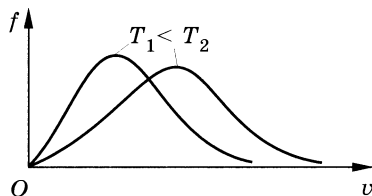


Рис. 65

скорости которых лежат в интервале от v до $v + \Delta v$, находится как площадь заштрихованной на рис. 64 полоски.

Скорость, при которой функция распределения молекул идеального газа по скоростям максимальна, называется **наиболее вероятной скоростью**:

$$v_B = \sqrt{\frac{2RT}{M}} = \sqrt{\frac{2kT}{m_0}}.$$

Из этой формулы следует, что при повышении температуры максимум функции распределения молекул по скоростям (рис. 65) сместится вправо (значение наиболее вероятной скорости становится больше). Однако площадь, ограниченная кривой, остается неизменной, поэтому при повышении температуры кривая распределения молекул по скоростям будет растягиваться и понижаться.

ХОЛОДИЛЬНАЯ МАШИНА — периодически действующая установка, в которой за счет работы внешних сил теплота переносится к телам с более высокой температурой.

Принцип действия холодильной машины представлен на рис. 66. Системой за цикл от термостата с более низкой температурой T_2 отнимается количество теплоты Q_2 и отдается термостату с более высокой температурой T_1 количество теплоты Q_1 . Для кругового процесса $Q = A$, но, по условию, $Q = Q_2 - Q_1 < 0$, поэтому $A < 0$ и $Q_2 - Q_1 = -A$, или $Q_1 = Q_2 + A$, т. е. количество теплоты Q_1 , отданное системой источнику теплоты при более высокой температуре T_1 , больше количества теплоты Q_2 , полученного от источника теплоты при более низкой температуре T_2 , на величину работы, совершенной над системой. Следовательно, без совершения работы нельзя отбирать теплоту от менее нагретого тела и отдавать ее более нагретому.

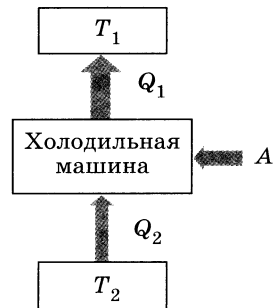
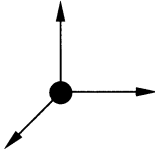
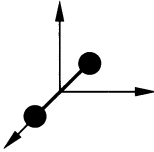
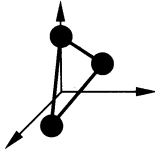


Рис. 66

ЧИСЛО СТЕПЕНЕЙ СВОБОДЫ МОЛЕКУЛ. Независимо от общего числа степеней свободы молекул три степени свободы всегда поступательные. Ни одна из поступательных степеней свободы не имеет преимущества перед другими, поэтому на каждую из них приходится в среднем одинаковая энергия

$$\langle \varepsilon_1 \rangle = \frac{\langle \varepsilon_0 \rangle}{3} = \frac{1}{2} kT.$$

В классической механике молекулу одноатомного газа рассматривают как материальную точку, которой приписывают три степени свободы поступательного движения. Молекулу двухатомного газа рассматривают как совокупность двух материальных точек, жестко связанных недеформируемой связью. Она обладает пятью степенями свободы (три степени свободы поступательного движения и две — вращательного движения). Трехатомная молекула имеет шесть степеней свободы.

Модель молекулы		Газ		
		одноатомный	двухатомный	многоатомный
				
Число степеней свободы	поступательных	3	3	3
	вращательных	—	2	3
	всего	3	5	6

ШАРЛЯ ЗАКОН — один из основных законов идеального газа: *давление данной массы газа при постоянном объеме изменяется линейно с температурой:*

$$p = p_0(1 + \alpha t) \text{ при } V = \text{const}, \quad m = \text{const},$$

где t — температура по шкале Цельсия, p_0 — давление при 0°C , α — коэффициент термического расширения: $\alpha = 1/273 \text{ K}^{-1}$.

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

АМПЕРА ЗАКОН: на элемент l проводника с током I , помещенного в однородное магнитное поле с индукцией \vec{B} , действует сила \vec{F} , модуль которой равен:

$$F = IBl \sin \alpha,$$

где α — угол между направлением элемента проводника с током и вектором магнитной индукции \vec{B} .

Направление силы Ампера определяется **по правилу левой руки**: если ладонь левой руки расположить так, чтобы в нее входил вектор \vec{B} , а четыре вытянутых пальца расположить по направлению тока в проводнике, то отогнутый на 90° большой палец покажет направление силы, действующей на проводник с током (рис. 67).

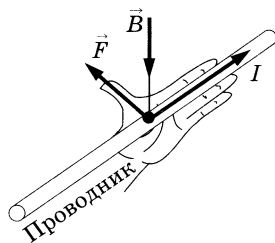


Рис. 67

Закон Ампера используется для определения единицы магнитной индукции (см. **Магнитная индукция**).

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ТОКОВ. Рассмотрим два бесконечных прямолинейных параллельных тока I_1 и I_2 (направления токов указаны на рис. 68), расстояние между которыми равно R . Каждый из проводников создает магнитное поле, которое действует по закону Ампера на другой проводник с током. Определим, с какой силой действует магнитное поле тока I_1 на элемент Δl второго проводника с током I_2 . Ток I_1 создает вокруг себя магнитное поле, линии магнитной индукции кото-

рого представляют собой концентрические окружности. Направление вектора магнитной индукции \vec{B}_1 определяется правилом правого винта, его модуль (см. Магнитное поле прямого тока) рассчитывается по формуле:

$$B_1 = \frac{\mu_0 \mu}{2\pi} \frac{I_1}{R}.$$

Направление силы $\Delta \vec{F}_1$, с которой магнитное поле с индукцией \vec{B}_1 действует на участок Δl второго тока, определяется по правилу левой руки и указано на рис. 68. Модуль силы $\Delta \vec{F}_1$, с учетом того, что угол α между элементами тока I_2 и вектором \vec{B}_1 прямой, равен:

$$\Delta F_1 = I_2 B_1 \Delta l;$$

подставляя значение для B_1 , получим

$$\Delta F_1 = \frac{\mu_0 \mu}{2\pi} \frac{I_1 I_2}{R} \Delta l.$$

Рассуждая аналогично, можно показать, что сила $\Delta \vec{F}_2$, с которой магнитное поле тока I_2 действует на элемент Δl первого проводника с током I_1 , направлена в противоположную сторону и по модулю равна:

$$\Delta F_2 = I_1 B_2 \Delta l = \frac{\mu_0 \mu}{2\pi} \frac{I_1 I_2}{R} \Delta l.$$

Сравнив выражения для ΔF_1 и ΔF_2 , можно определить, что

$$\Delta F_1 = \Delta F_2,$$

т. е. два параллельных тока одинакового направления притягиваются друг к другу с силой

$$\Delta F = \frac{\mu_0 \mu}{2\pi} \frac{I_1 I_2}{R} \Delta l.$$

Если токи имеют противоположные направления, то, используя правило левой руки, можно показать, что между ними действует сила отталкивания.

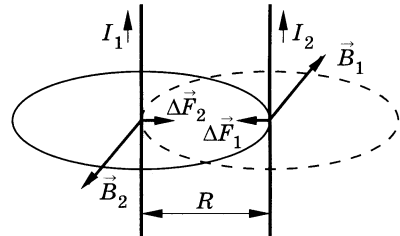


Рис. 68

ВИХРЕВОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ — электрическое поле, порождаемое переменным магнитным полем. Изменяясь во времени, магнитное поле порождает поле электрическое. Это — следствие обобщения закона Фарадея для электромагнитной индукции, а именно: сущность явления электромагнитной индукции — процесс порождения переменным магнитным полем поля электрического.

Из закона Фарадея $\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt}$ следует, что любое изменение сцепленного с контуром потока магнитной индукции приводит к возникновению электродвижущей силы индукции и вследствие этого появляется индукционный ток. Следовательно, возникновение ЭДС электромагнитной индукции возможно и в *неподвижном контуре*, находящемся в *переменном магнитном поле*. Максвелл высказал гипотезу, что *всякое переменное магнитное поле возбуждает в окружающем пространстве электрическое поле, которое и является причиной возникновения индукционного тока в контуре*. Согласно представлениям Максвелла, контур, в котором появляется ЭДС, играет второстепенную роль, являясь своего рода лишь «прибором», обнаруживающим это поле.

Возникающее при этом электрическое поле по сути совершенно другое, чем электростатическое. Оно создается не зарядами (а переменным магнитным полем!), поэтому линии напряженности не начинаются и не заканчиваются на зарядах, как в случае электростатического поля, а представляют собой *замкнутые линии*, подобные линиям индукции магнитного поля (поэтому это поле и называется *вихревым*). Направление вектора напряженности вихревого электрического поля определяется согласно закону Фарадея для электромагнитной индукции и правилу Ленца.

В отличие от электростатического поля работа вихревого электрического поля на *замкнутом* пути *не равна нулю*. Работа вихревого электрического поля по перемещению единичного положительного заряда вдоль замкнутого проводника численно равна ЭДС индукции, возникающей в проводнике, находящемся в переменном магнитном поле.

ВИХРЕВЫЕ ТОКИ (ТОКИ ФУКО) — индукционные токи, возникающие в массивных сплошных проводниках, помещенных в переменное магнитное поле. Эти токи оказываются замкнутыми в толще проводника и поэтому называются **вихревыми** или **токами Фуко** (по имени первого исследователя).

Направление токов Фуко определяется по правилу Л е н ц а: их магнитное поле направлено так, чтобы противодействовать изменению магнитного потока, индуцирующему вихревые токи. Например, если между полюсами невключенного электромагнита массивный медный маятник совершает практически незатухающие колебания, то при включении тока он испытывает сильное торможение и очень быстро останавливается. Это объясняется тем, что возникшие токи Фуко имеют такое направление, что действующие на них со стороны магнитного поля силы тормозят движение маятника. Этот факт используется для успокоения (демпфирования) подвижных частей различных приборов. Если в описанном маятнике сделать радиальные вырезы, то вихревые токи ослабляются и торможение почти отсутствует.

Вихревые токи помимо торможения (как правило, нежелательного эффекта) вызывают нагревание проводников. Поэтому для уменьшения потерь на нагревание якоря генераторов и сердечники трансформаторов делают не сплошными, а изготовляют из тонких пластин, отделенных одна от другой слоями изолятора, и устанавливают их так, чтобы вихревые токи были направлены поперек пластин. Джоулева теплота, выделяемая токами Фуко, используется в индукционных металлургических печах.

ГАЗОВЫЙ РАЗРЯД, ВИДЫ. Газовый разряд — прохождение электрического тока через газы. Характер газового разряда определяется составом газа, его температурой и давлением, размерами, конфигурацией и материалом электродов, приложенным напряжением, плотностью тока.

Рассмотрим цепь, содержащую газовый промежуток (рис. 69, а), подвергающийся непрерывному, постоянному по интенсивности воздействию ионизатора. В результате действия ионизатора газ приобретает некоторую электропровод-

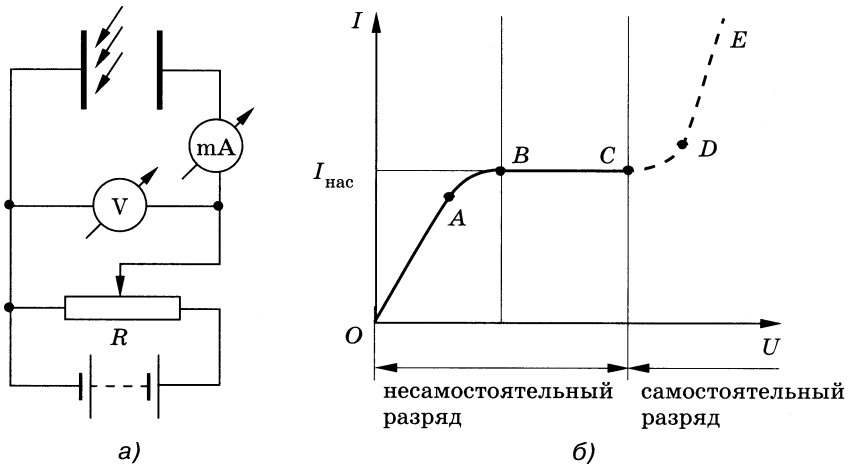


Рис. 69

ность, и в цепи потечет ток, зависимость которого от приложенного напряжения дана на рис. 69, б.

На участке OA кривой сила тока возрастает пропорционально напряжению, т. е. выполняется закон Ома. При дальнейшем увеличении напряжения закон Ома нарушается: рост силы тока замедляется (участок AB) и наконец прекращается совсем (участок BC). Это возможно в том случае, когда ионы и электроны, создаваемые внешним ионизатором за единицу времени, за это же время достигают электродов. В результате получаем ток насыщения ($I_{\text{нас}}$), значение которого определяется мощностью ионизатора. Ток насыщения, таким образом, является мерой ионизирующего действия ионизатора. Если в режиме OC остановить действие ионизатора, то прекращается и разряд. **Разряды**, существующие только под действием внешних ионизаторов, называются **несамостоятельными**.

Разряд в газе, сохраняющийся после прекращения действия внешнего ионизатора, называется **самостоятельным**. При больших напряжениях между электродами газового промежутка ток сильно возрастает (участки CD и DE на рис. 69, б). Это связано с тем, что при больших напряжениях возникающие под действием внешнего ионизатора электроны, сильно

ускоренные электрическим полем, сталкиваясь с нейтральными молекулами газа, ионизируют их. В результате образуются вторичные электроны и положительные ионы. Положительные ионы движутся к катоду, а электроны — к аноду. Вторичные электроны вновь ионизируют молекулы газа, и, следовательно, общее количество электронов и ионов будет возрастать по мере продвижения электронов к аноду лавинообразно, что является причиной увеличения электрического тока на участке CD (см. рис. 69, б). Описанный процесс называется **ударной ионизацией**.

В зависимости от давления газа, конфигурации электродов, параметров внешней цепи можно говорить о *четырёх типах самостоятельного разряда*: тлеющем, искровом, дуговом и коронном.

Тлеющий разряд возникает при низких давлениях.

Искровой разряд возникает при больших напряженностях электрического поля ($\approx 3 \cdot 10^6$ В/м) в газе, находящемся под давлением порядка атмосферного. Искра имеет вид ярко светящегося тонкого канала, сложным образом изогнутого и разветвленного.

Дуговой разряд. Если после зажигания искрового разряда от мощного источника постепенно уменьшать расстояние между электродами, то разряд становится непрерывным — возникает дуговой разряд. При этом сила тока резко возрастает, достигая сотен ампер, а напряжение на разрядном промежутке падает до нескольких десятков вольт. Дуговой разряд можно получить от источника низкого напряжения, минуя стадию искры. Для этого электроды (например, угольные) сближают до соприкосновения, они сильно раскаляются электрическим током, потом их разводят и получают электрическую дугу.

Коронный разряд — высоковольтный электрический разряд при высоком (например, атмосферном) давлении в резко неоднородном поле вблизи электродов с большой кривизной поверхности (например, острия). Когда напряженность поля вблизи острия достигает 30 кВ/см, то вокруг него возникает свечение, имеющее вид короны, чем и вызвано название этого вида разряда.

ДВИЖЕНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ. Для вывода общих закономерностей будем считать, что магнитное поле *однородно* и на частицы электрические поля не действуют.

1. Заряженная частица движется в магнитном поле со скоростью \vec{v} вдоль линий магнитной индукции (угол α между векторами \vec{v} и \vec{B} равен 0 или π). Тогда сила Лоренца равна нулю, т. е. магнитное поле на частицу не действует и *она движется равномерно и прямолинейно*.

2. Заряженная частица движется в магнитном поле со скоростью \vec{v} , перпендикулярной вектору \vec{B} (угол $\alpha = \pi/2$). Тогда сила Лоренца $F_{\text{Л}} = QvB$, постоянна по модулю и нормальна к траектории частицы. Частица будет двигаться *по окружности*, радиус r которой определяется из условия

$$QvB = \frac{mv^2}{r},$$

откуда

$$r = \frac{m v}{Q B}.$$

Период вращения частицы, т. е. время T , за которое она совершает один полный оборот,

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

Подставив в эту формулу выражение для радиуса r , получим

$$T = \frac{2\pi m}{B Q},$$

т. е. период вращения частицы в однородном магнитном поле определяется только величиной, обратной удельному заряду (Q/m) частицы, и магнитной индукцией поля, но не зависит от ее скорости (при $v \ll c$).

3. Заряженная частица движется со скоростью \vec{v} под углом α к вектору \vec{B} (рис. 70).

Движение частицы можно представить в виде суперпозиции: 1) *равномерного прямолинейного движения* вдоль поля со скоростью $v_{\parallel} = v \cos \alpha$; 2) *равномерного движения* со скоростью

$v_{\perp} = v \sin \alpha$ по окружности в плоскости, перпендикулярной полю. В результате сложения обоих движений возникает движение по спирали, ось которой параллельна магнитному полю. Шаг винтовой линии $h = v_{\parallel} T = v T \cos \alpha$, где $T = 2\pi r/v$ — период вращения частицы. Используя выражение для T , получим, что шаг винтовой линии

$$h = \frac{2\pi m v \cos \alpha}{BQ}.$$

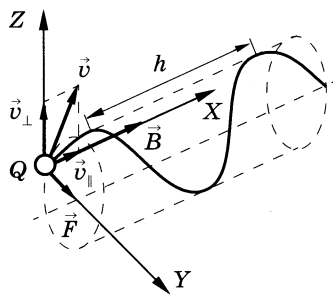


Рис. 70

ДИЭЛЕКТРИКИ — вещества, плохо проводящие электрический ток. В диэлектриках практически отсутствуют свободные электроны. Различают *неполярные* и *полярные диэлектрики* (см. Д и э л е к т р и к и, т и п ы). Во внешнем электростатическом поле диэлектрики *поляризуются* (см. П о л я р и з а ц и я д и э л е к т р и к о в).

ДИЭЛЕКТРИКИ, ТИПЫ. В зависимости от строения молекул различают **неполярные** и **полярные диэлектрики**.

Диэлектрик (как и всякое вещество) состоит из атомов и молекул. Так как положительный заряд всех ядер молекулы равен суммарному заряду электронов, то молекула в целом электрически нейтральна. Если заменить положительные заряды ядер молекул суммарным зарядом $+Q$, находящимся в центре «тяжести» положительных зарядов, а заряд всех электронов — суммарным отрицательным зарядом $-Q$, находящимся в центре «тяжести» отрицательных зарядов, то молекулу можно рассматривать как электрический диполь, обладающий электрическим (дипольным) моментом.

Первую группу диэлектриков (N_2 , H_2 , O_2 , CO_2 , CH_4 ...) составляют вещества, молекулы которых имеют симметричное строение, т. е. центры «тяжести» положительных и отрицательных зарядов в отсутствие внешнего электрического поля совпадают и, следовательно, дипольный момент молекулы \vec{p} равен нулю. **Молекулы** таких диэлектриков называются **неполярными**. Под действием внешнего электрического поля заря-

ды неполярных молекул смещаются в противоположные стороны (положительные по полю, отрицательные против поля) и молекула приобретает дипольный момент.

Вторую группу диэлектриков (H_2O , NH_3 , SO_2 , CO ...) составляют вещества, молекулы которых имеют асимметричное строение, т. е. центры «тяжести» положительных и отрицательных зарядов не совпадают. Таким образом, эти молекулы в отсутствие внешнего электрического поля обладают дипольным моментом, отличным от нуля. **Молекулы** таких диэлектриков называются **полярными**. При отсутствии внешнего поля, однако, дипольные моменты полярных молекул вследствие теплового движения ориентированы в пространстве хаотично и их результирующий момент равен нулю. Если такой диэлектрик поместить во внешнее поле, то силы этого поля будут стремиться повернуть диполи вдоль поля и возникает отличный от нуля результирующий момент.

ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА: *алгебраическая сумма электрических зарядов любой замкнутой системы (системы, не обменивающейся зарядами с внешними телами) остается неизменной, какие бы процессы ни происходили внутри данной системы:*

$$\sum_i Q_i = \text{const.}$$

Закон сохранения электрического заряда — *фундаментальный закон природы.*

ИНДУКТИВНОСТЬ КОНТУРА. САМОИНДУКЦИЯ. Электрический ток, текущий в замкнутом контуре, создает вокруг себя магнитное поле, индукция которого пропорциональна силе тока. Поэтому сцепленный с контуром магнитный поток Φ (а он пропорционален магнитной индукции) пропорционален силе тока I в контуре:

$$\Phi = LI,$$

где коэффициент пропорциональности L называется **индуктивностью контура**.

При изменении силы тока в контуре будет изменяться также и сцепленный с ним магнитный поток; следовательно,

в контуре будет индуцироваться ЭДС. Возникновение ЭДС индукции в проводящем контуре при изменении в нем силы тока называется **самоиндукцией**.

Единица индуктивности — **генри** (Гн): 1 Гн — индуктивность такого контура, магнитный поток самоиндукции которого при токе 1 А равен 1 Вб:

$$1 \text{ Гн} = 1 \text{ Вб/А} = 1 \text{ В} \cdot \text{с/А}.$$

Применяя к явлению самоиндукции закон Фарадея

($\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ или $\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt}$), получим выражение для ЭДС самоиндукции:

$$\mathcal{E}_i = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad \text{или} \quad \mathcal{E}_i = -L \frac{dI}{dt}.$$

Считается, что $L = \text{const}$ (контур не деформируется и магнитная проницаемость среды постоянна). Знак минус обусловлен правилом Ленца и показывает, что индуктивность контура приводит к *замедлению изменения* тока в нем. Таким образом, контур, обладая определенной индуктивностью, приобретает электрическую инертность, заключающуюся в том, что любое изменение тока тормозится тем сильнее, чем больше индуктивность контура.

Индуктивность контура зависит только от геометрической формы контура, его размеров и магнитной проницаемости той среды, в которой он находится. В этом смысле индуктивность контура — аналог электрической емкости уединенного проводника, которая также зависит только от формы проводника, его размеров и диэлектрической проницаемости среды.

ИОНИЗАЦИЯ ГАЗОВ — превращение электрически нейтральных атомов и молекул газа в результате удаления у них одного или нескольких электронов в положительные ионы и свободные электроны.

Газы при не слишком высоких температурах и при давлениях, близких к атмосферному, являются хорошими изоляторами. Если поместить в сухой атмосферный воздух заряженный электромметр с хорошей изоляцией, то его заряд долго остается неизменным. Это объясняется тем, что газы при обычных условиях состоят из нейтральных атомов и молекул и не содер-

жат свободных зарядов (электронов и ионов). Газ становится проводником электричества, когда некоторая часть его молекул **ионизуется**, т. е. произойдет расщепление нейтральных атомов и молекул на ионы и свободные электроны. Внешнее воздействие, под влиянием которого происходит ионизация газов, называется **ионизатором**.

Ионизация газов может происходить под действием различных ионизаторов: сильный нагрев (столкновения быстрых молекул становятся настолько сильными, что они разбиваются на ионы), короткое электромагнитное излучение (ультрафиолетовое, рентгеновское и γ -излучения), корпускулярное излучение (потoki электронов, протонов, α -частиц) и т. д. Для того чтобы выбить из молекулы (атома) один электрон, необходимо затратить определенную энергию, называемую **энергией ионизации**, значения которой для атомов различных веществ лежат в пределах $4 \div 25$ эВ.

Одновременно с процессом ионизации газа всегда идет и обратный процесс — **рекомбинация**: положительные и отрицательные ионы, положительные ионы и электроны, встречаясь, воссоединяются между собой с образованием нейтральных атомов и молекул. Чем больше ионов возникает под действием ионизатора, тем интенсивнее идет и процесс рекомбинации.

КИРХГОФА ПРАВИЛА (законы Кирхгофа) позволяют рассчитывать сложные цепи постоянного тока.

Любая точка разветвления цепи, в которой сходится не менее трех проводников с током, называется **узлом**. При этом ток, входящий в узел, считается положительным, а ток, выходящий из узла, — отрицательным.

Первое правило Кирхгофа (рис. 71): алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю:

$$\sum_k I_k = 0.$$

Это правило является следствием закона сохранения электрического заряда.

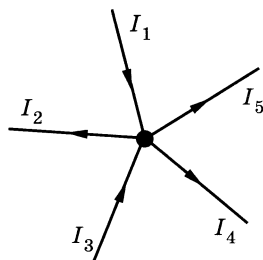


Рис. 71

Второе правило Кирхгофа (рис. 72): в любом замкнутом контуре, произвольно выбранном в разветвленной электрической цепи, алгебраическая сумма произведений сил токов I_i на сопротивления R_i соответствующих участков этого контура равна алгебраической сумме ЭДС \mathcal{E}_k , встречающихся в этом контуре:

$$\sum_i I_i R_i = \sum_k \mathcal{E}_k.$$

Это правило является следствием закона Ома.

При расчете сложных цепей постоянного тока с применением правил Кирхгофа необходимо:

1. Выбрать *произвольное* направление токов на всех участках цепи; действительное направление токов определяется при решении задачи: если искомый ток получится положительным, то его направление было выбрано правильно, отрицательным — его истинное направление противоположно выбранному.

2. Выбрать направление обхода контура и строго его придерживаться. Произведение IR положительно, если ток на данном участке совпадает с направлением обхода, и, наоборот; ЭДС, действующие по выбранному направлению обхода, считаются положительными, против — отрицательными.

3. Составить столько уравнений, чтобы их число было равно числу искомых величин (в систему уравнений должны войти все сопротивления и ЭДС рассматриваемой цепи); каждый рассматриваемый контур должен содержать хотя бы один элемент, не содержащийся в предыдущих контурах, иначе получатся уравнения, являющиеся простой комбинацией уже составленных.

КОНТАКТ ПОЛУПРОВОДНИКОВ p - И n -ТИПОВ (p - n -ПЕРЕХОД) — граница соприкосновения двух полупроводников, один из которых имеет электронную, а другой дырочную

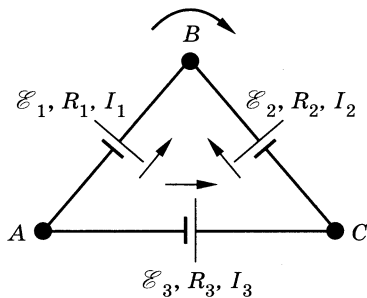


Рис. 72

п р о в о д и м о с т ь. Эти переходы имеют большое практическое значение, являясь основой работы многих полупроводниковых приборов. $p-n$ -Переход нельзя осуществить просто механическим соединением двух полупроводников. Обычно области различной проводимости создают либо при выращивании кристаллов, либо при соответствующей их обработке.

Толщина слоя $p-n$ -перехода в полупроводниках составляет примерно $10^{-6}—10^{-7}$ м, а контактная разность потенциалов — десятые доли вольт. Носители тока способны преодолеть такую разность потенциалов лишь при температуре в несколько тысяч градусов, т. е. при обычных температурах равновесный **контактный слой** является **запирающим** (характеризуется повышенным сопротивлением).

Сопротивление запирающего слоя можно изменить с помощью внешнего электрического поля. Если приложенное к $p-n$ -переходу внешнее электрическое поле направлено от p -полупроводника к n -полупроводнику (рис. 73, а), т. е. совпадает с полем контактного слоя, то оно вызывает движение электронов в n -полупроводнике и дырок в p -полупроводнике от границы $p-n$ -перехода в противоположные стороны. В результате запирающий слой расширится и его сопротивление возрастет. **Направление** внешнего поля, расширяющего запирающий слой, называется **запирающим (обратным)**. В этом направлении электрический ток через $p-n$ -переход практически

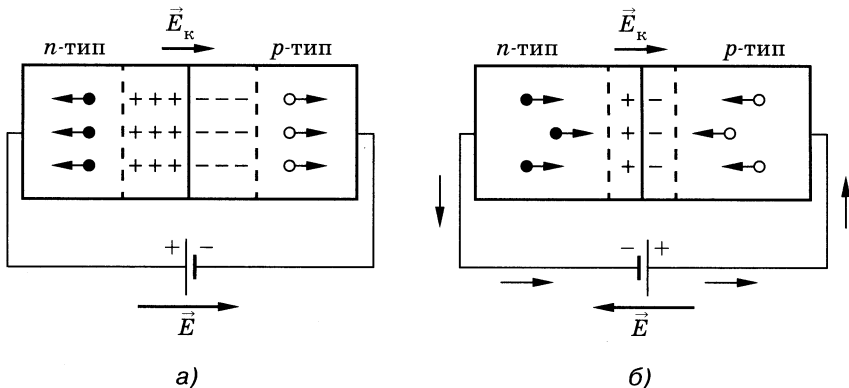


Рис. 73

не проходит. Ток в запирающем слое в обратном направлении образуется лишь за счет неосновных носителей тока (электронов в p -полупроводнике и дырок в n -полупроводнике).

Если приложенное к p — n -переходу внешнее электрическое поле направлено противоположно полю контактного слоя (рис. 73, б), то оно вызывает движение электронов в n -полупроводнике и дырок в p -полупроводнике к границе p — n -перехода навстречу друг другу. В этой области они рекомбинируют, толщина контактного слоя и его сопротивление уменьшаются. Следовательно, в этом направлении электрический ток проходит сквозь p — n -переход в **направлении** от p -полупроводника к n -полупроводнику; оно называется **пропускным (прямым)**.

Таким образом, p — n -переход обладает *односторонней (вентильной) проводимостью*.

КУЛОНА ЗАКОН — основной закон электростатики: *сила взаимодействия F между двумя неподвижными точечными зарядами, находящимися в вакууме, пропорциональна зарядам Q_1 и Q_2 и обратно пропорциональна квадрату расстояния r между ними:*

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|Q_1||Q_2|}{r^2}.$$

Величина ϵ_0 называется **электрической постоянной**; она относится к числу *фундаментальных физических постоянных* и равна:

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}^2/(\text{Н} \cdot \text{м}^2), \text{ или } \epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м},$$

где **фарад (Ф)** — единица электрической емкости. Тогда

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \text{ м/Ф}.$$

Сила \vec{F} направлена по прямой, соединяющей взаимодействующие заряды, т. е. является центральной, и соответствует притяжению ($F < 0$) в случае разноименных зарядов и отталкиванию ($F > 0$) в случае одноименных зарядов. Эта сила называется **кулоновской силой**.

Если взаимодействующие заряды находятся в однородной и изотропной среде, то кулоновская сила

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|Q_1||Q_2|}{\epsilon r^2},$$

где ϵ — **диэлектрическая проницаемость среды**, показывающая, во сколько раз сила взаимодействия F между зарядами в данной среде меньше их силы взаимодействия F_0 в вакууме:

$$\epsilon = \frac{F_0}{F}$$

(для вакуума $\epsilon = 1$).

ЛЕНЦА ПРАВИЛО — правило, определяющее направление индукционного тока: *и н д у к ц и о н н ы й т о к в к о н т у р е и м е е т в с е г д а т а к о е н а п р а в л е н и е , ч т о с о з д а в а е м о е и м м а г н и т н о е п о л е п р е п я т с т в у е т и з м е н е н и ю м а г н и т н о г о п о т о к а , в ы з ы в а в ш е г о э т о т и н д у к ц и о н н ы й т о к .*

Правило Ленца — общее правило для нахождения направления индукционного тока, является *следствием закона сохранения энергии*. Если к неподвижному замкнутому проводящему контуру приближать полосовой магнит, то магнитный поток будет увеличиваться и в контуре возникает индукционный ток I_i , причем направление \vec{B}_i (вектор магнитной индукции поля индукционного тока) и направление индукционного тока подчиняются **правилу правого винта** (рис. 74).

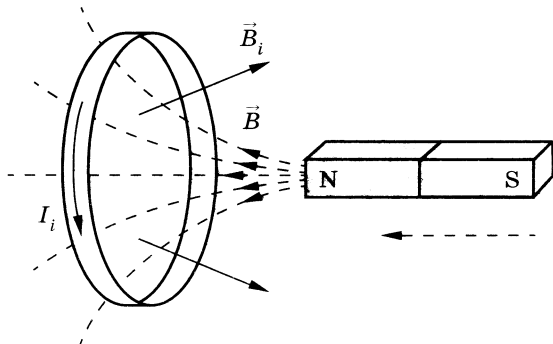


Рис. 74

ЛИНИИ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ — линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора напряженности \vec{E} (рис. 75). Поскольку электростатическое поле является *силовым*, то его можно изобразить графически с помощью **линий напряженности**. Линиям напряженности приписывается направление, совпадающее с направлением вектора напряженности. Так как в каждой данной точке пространства вектор напряженности имеет лишь одно направление, то линии напряженности никогда не пересекаются. Для **однородного поля** (когда вектор напряженности в любой точке постоянен по величине и направлению) линии напряженности параллельны вектору напряженности.

Чтобы с помощью линий напряженности можно было характеризовать не только направление, но и величину напряженности электростатического поля, условились проводить их с определенной густотой (см. рис. 75): число линий напряженности, пронизывающих единицу площади поверхности, перпендикулярную линиям напряженности, должно быть равно модулю вектора \vec{E} .

Если поле создается точечным зарядом, то линии напряженности — радиальные прямые, выходящие из заряда, если он *положителен*, и входящие в него, если заряд *отрицателен* (рис. 76). Вследствие большой наглядности графический способ представления электростатического поля широко применяется в электротехнике.

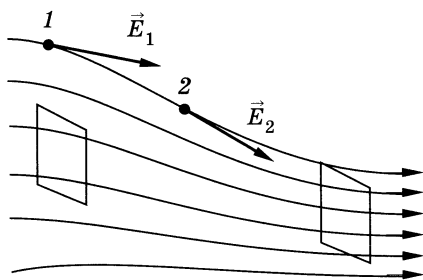


Рис. 75

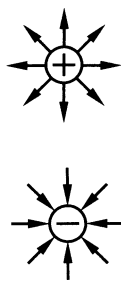


Рис. 76

ЛИНИИ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ — линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора магнитной индукции \vec{B} . Так как магнитное поле является *силовым*, то его, по аналогии с электрическим, изображают с помощью **линий магнитной индукции**. Их направление задается **правилом правого винта**: головка винта, ввинчиваемого по направлению тока, вращается в направлении линий магнитной индукции. Линии магнитной индукции всегда *замкнуты* и охватывают проводники с током (рис. 77, а).

Линии магнитной индукции можно «проявить» с помощью железных опилок, намагничивающихся в исследуемом поле и ведущих себя подобно маленьким магнитным стрелкам. На рис. 77, б изображены полученные таким образом линии магнитной индукции с о л е н о и д а.

На рис. 77, в изображены линии магнитной индукции полосового магнита; они выходят из северного полюса и входят в южный. На первый взгляд здесь наблюдается полная аналогия с линиями напряженности электростатического поля, и полюсы магнитов играют роль магнитных «зарядов» (магнитных монополей). Однако опыты показали, что, разрезая магнит на части, его полюсы разделить нельзя, т. е. в отличие от электрических зарядов свободные магнитные «заряды» не существуют, поэтому линии магнитной индукции не могут обрываться на полюсах. В дальнейшем было установлено, что внутри полосовых магнитов имеется магнитное поле, аналогичное полю внутри соленоида, и линии магнитной индукции этого магнитного поля являются продолжением линий магнитной индукции вне магнита. Таким образом, линии магнитной индукции магнитного поля постоянных магнитов являются также замкнутыми.

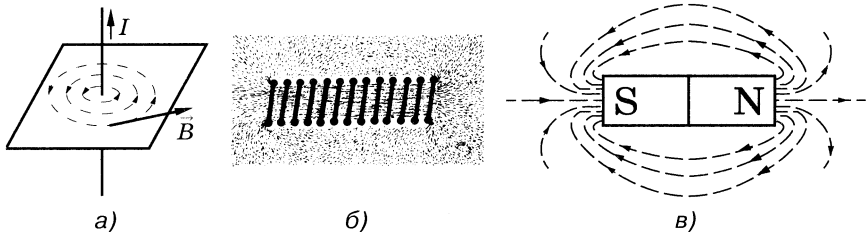


Рис. 77

ЛОРЕНЦА СИЛА — сила, с которой магнитное поле действует на движущийся электрический заряд. В магнитном поле с индукцией \vec{B} на движущийся со скоростью \vec{v} заряд Q действует сила Лоренца, модуль которой равен:

$$F_{\text{Л}} = QvB \sin \alpha,$$

где α — угол между векторами \vec{v} и \vec{B} .

Направление силы Лоренца определяется с помощью **правила левой руки**: если ладонь левой руки расположить так, чтобы в нее входил вектор магнитной индукции \vec{B} , а четыре вытянутых пальца направить вдоль вектора скорости \vec{v} (для $Q > 0$ направления I и \vec{v} совпадают, для $Q < 0$ — противоположны), то отогнутый на 90° большой палец покажет направление силы, действующей на *положительный заряд* (рис. 78, а). На рис. 78, б и в показаны взаимная ориентация векторов \vec{v} и \vec{B} (поле, направленное к нам, на рисунке показано точками) и сила Лоренца для положительного и отрицательного зарядов.

Сила Лоренца всегда перпендикулярна скорости движения заряженной частицы, поэтому она изменяет только направление этой скорости, не изменяя ее модуля. Следовательно, сила Лоренца работы не совершает. Иными словами, постоянное магнитное поле не совершает работы над движущейся в нем заряженной частицей и кинетическая энергия этой частицы при движении в магнитном поле не изменяется.

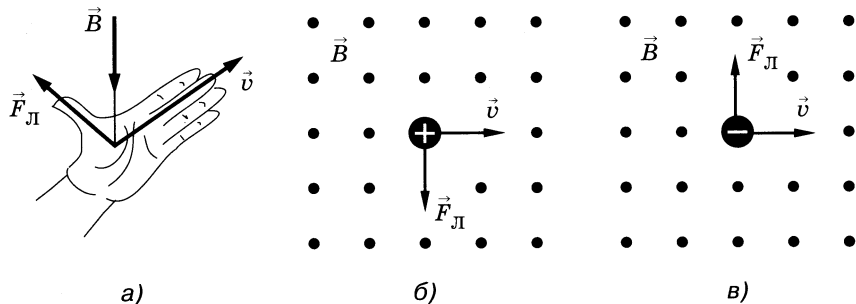


Рис. 78

МАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ — силовая характеристика магнитного поля.

Магнитная индукция может быть определена из закона Ампера — это векторная величина, модуль которой определяется отношением максимальной силы F_{\max} , действующей со стороны магнитного поля на участок проводника с током, к силе этого тока I и длине участка проводника Δl :

$$B = \frac{F_{\max}}{I\Delta l}.$$

В данной точке *однородного* магнитного поля магнитная индукция определяется максимальным вращающим механическим моментом, действующим на рамку с магнитным моментом, равным единице, когда нормаль к рамке перпендикулярна направлению поля:

$$B = \frac{M_{\max}}{p_m},$$

где $p_m = IS$ (I — сила тока в контуре, S — площадь поверхности рамки) — **магнитный момент рамки с током**. Направление вектора \vec{p}_m совпадает с направлением положительной нормали к рамке.

Единица магнитной индукции — **тесла (Тл)**: 1 Тл равна магнитной индукции такого однородного магнитного поля, которое действует с силой 1 Н на каждый метр длины проводника, расположенного перпендикулярно направлению поля, если по этому проводнику протекает ток 1 А. 1 Тл = 1 Н/(А · м).

МАГНИТНАЯ ПОСТОЯННАЯ. Пусть два параллельных проводника с токами находятся в вакууме ($\mu = 1$). Согласно определению ампера, если $I_1 = I_2 = 1$ А, $\Delta l = 1$ м и $R = 1$ м, то сила взаимодействия между этими проводниками $F = 2 \cdot 10^{-7}$ Н. Используя формулу для взаимодействующих токов (см. Взаимодействие параллельных токов)

$$F = \frac{\mu_0 \mu}{2\pi} \frac{I_1 I_2}{R} \Delta l,$$

можем записать

$$2 \cdot 10^{-7} \text{ Н} = \mu_0 \frac{1 \text{ А} \cdot 1 \text{ А} \cdot 1 \text{ м}}{2\pi \cdot 1 \text{ м}},$$

откуда

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Н}}{\text{м}} = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}.$$

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ — силовое поле в пространстве, окружающем токи и постоянные магниты. Важнейшая особенность магнитного поля состоит в том, что оно действует *только на движущиеся* в этом поле электрические заряды. Опыт показывает, что характер воздействия магнитного поля на ток различен в зависимости от формы проводника, по которому течет ток, от расположения проводника и от направления тока.

При исследовании магнитного поля используется **замкнутый плоский контур с током (рамка с током)**, линейные размеры которого малы по сравнению с расстоянием до токов, образующих магнитное поле. Ориентация контура в пространстве задается направлением нормали к контуру. Направление нормали определяется **правилом правого винта**: за положительное направление нормали принимается направление поступательного движения винта, головка которого вращается в направлении тока, текущего в рамке (рис. 79).

За направление магнитного поля в данной точке принимается направление, вдоль которого располагается положительная нормаль к рамке или направление, совпадающее с направ-

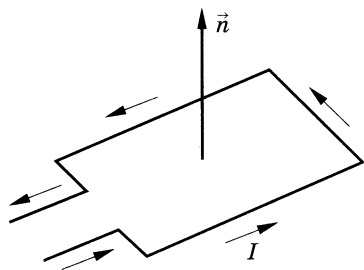


Рис. 79

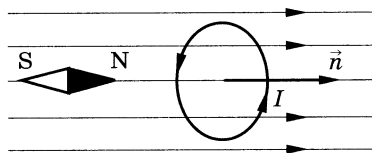


Рис. 80

лением силы, которая действует на северный полюс магнитной стрелки, помещенной в данную точку (рис. 80). Так как оба полюса магнитной стрелки лежат в близких точках поля, то силы, действующие на оба полюса, равны друг другу. Следовательно, на магнитную стрелку действует пара сил, поворачивающая ее так, чтобы ось стрелки, соединяющая южный полюс с северным, совпадала с направлением поля.

Количественной характеристикой магнитного поля является **магнитная индукция**.

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ПРЯМОГО ТОКА. Магнитная индукция поля, созданного бесконечно длинным прямым проводником с током I , в точке, удаленной от оси проводника на расстояние R , равна:

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

где μ_0 — магнитная постоянная, μ — **магнитная проницаемость среды** — безразмерная физическая величина, показывающая, во сколько раз индукция магнитного поля в однородной среде отличается по модулю от индукции магнитного поля в той же точке пространства в вакууме.

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВА. Электроны в атомах и молекулах, двигаясь по замкнутым орбитам, образуют замкнутые электрические токи, получившие название **молекулярных токов**. Молекулярный ток (как любой замкнутый контур с током) обладает **магнитным моментом** и создает собственное магнитное поле. Согласно *гипотезе Ампера* магнитные свойства вещества определяются именно молекулярными токами.

Всякое вещество является **магнетиком** и способно намагничиваться во внешнем магнитном поле, т. е. создавать собственное магнитное поле. По магнитным свойствам вещества делятся на парамагнетики, диамагнетики и ферромагнетики.

Парамагнетики — вещества, намагничивающиеся во внешнем магнитном поле по направлению поля. Атомы (молекулы) парамагнетиков обладают магнитным моментом. Однако вследствие теплового движения молекул их магнитные мо-

менты ориентированы беспорядочно, поэтому парамагнитные вещества магнитными свойствами не обладают. При внесении парамагнетика во внешнее магнитное поле устанавливается *преимущественная* ориентация магнитных моментов атомов *по полю* (полной ориентации препятствует тепловое движение атомов). Таким образом, парамагнетик намагничивается, создавая собственное магнитное поле, совпадающее по направлению с внешним полем и усиливающее его. У парамагнетиков вектор магнитной индукции \vec{B}' собственного магнитного поля сонаправлен с вектором магнитной индукции \vec{B}_0 внешнего (намагничивающего) поля: $\vec{B}' \uparrow \uparrow \vec{B}_0$.

Магнитная проницаемость парамагнетиков $\mu \geq 1$ (правда, незначительно: для платины, например, $\mu = 1,00025$). К парамагнетикам относятся воздух, кислород, платина, алюминий, щелочные и щелочноземельные металлы. Для парамагнетиков магнитная проницаемость зависит от температуры, в основном (за немногими исключениями) обратно пропорциональна T .

Диамагнетики — вещества, намагничивающиеся против направления действующего на него внешнего магнитного поля. Магнитный момент атомов диамагнетиков равен нулю. При внесении диамагнетика во внешнее магнитное поле индуцируется микроток. Так как этот микроток индуцирован внешним магнитным полем, то, согласно правилу Ленца, у атома появляется составляющая магнитного поля, направленная противоположно внешнему полю. Наведенные составляющие магнитных полей атомов (молекул) складываются и образуют собственное магнитное поле вещества, ослабляющее внешнее магнитное поле. У диамагнетиков вектор магнитной индукции \vec{B}' собственного магнитного поля направлен противоположно вектору магнитной индукции \vec{B}_0 внешнего (намагничивающего) поля: $\vec{B}' \uparrow \downarrow \vec{B}_0$.

Магнитная проницаемость диамагнетиков $\mu \leq 1$ (правда, незначительно: для висмута, например, $\mu = 0,99985$). К диамагнетикам относятся инертные газы, металлы, стекло, вода и т. д. Для диамагнетиков магнитная проницаемость не зависит от температуры.

Ферромагнетики — вещества (железо, никель, кобальт, гадолиний, некоторые сплавы), у которых индукция собственного магнитного поля в сотни и тысячи раз превышает индукцию внешнего (намагничивающего) поля. Для ферромагнетиков $\mu \gg 1$, например для железа (чистого) $\mu \approx 10^4$. Особенность ферромагнетиков заключается в том, что для каждого ферромагнетика имеется определенная температура, называемая **точкой Кюри**, при которой он теряет свои магнитные свойства. При нагревании образца выше точки Кюри ферромагнетик превращается в обычный парамагнетик. При температуре ниже точки Кюри ферромагнетик состоит из **доменов** — областей спонтанной намагниченности (линейные размеры доменов 0,001—0,01 см).

МАГНИТНЫЙ ПОТОК — поток вектора магнитной индукции через какую-либо поверхность. Магнитный поток сквозь поверхность площадью S определяется по формуле:

$$\Phi = BS \cos \alpha,$$

где α — угол между вектором магнитной индукции \vec{B} и нормалью \vec{n} к поверхности. Магнитный поток может быть как положительным, так и отрицательным в зависимости от знака $\cos \alpha$ (определяется выбором положительного направления нормали). Магнитный поток связывают с контуром, по которому течет ток. В таком случае положительное направление нормали к контуру нами уже определено (см. Магнитное поле): оно связано с током правилом правого винта. Таким образом, *магнитный поток, создаваемый контуром через поверхность, ограниченную им самим, всегда положителен.*

Для однородного поля и плоской поверхности, расположенной перпендикулярно вектору магнитной индукции, магнитный поток будет равен:

$$\Phi = BS.$$

Единица магнитного потока — **вебер (Вб)**: 1 Вб — магнитный поток, проходящий сквозь плоскую поверхность площадью

1 м^2 , расположенную перпендикулярно однородному магнитному полю, индукция которого равна 1 Тл . $1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot \text{м}^2$.

МЕХАНИЧЕСКИЙ МОМЕНТ СИЛ, действующий на рамку с током в магнитном поле. На рамку с током, помещенную в однород-

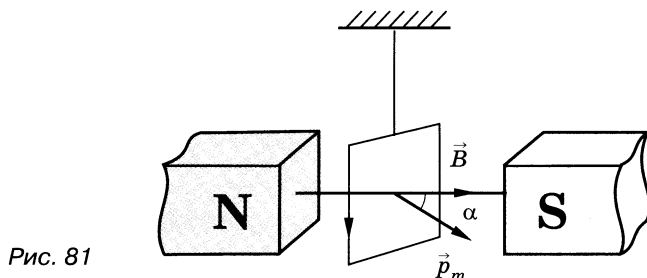


Рис. 81

ное магнитное поле, действует вращающий **механический момент сил** \vec{M} , модуль которого равен:

$$M = p_m B \sin \alpha,$$

где p_m — модуль вектора магнитного момента рамки с током, B — модуль вектора магнитной индукции, α — угол между векторами \vec{p}_m и \vec{B} (рис. 81).

НАПРЯЖЕННОСТЬ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ — физическая величина, определяемая силой, действующей на пробный единичный положительный заряд, помещенный в эту точку поля:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q_0}.$$

Если в поле, создаваемое зарядом Q , поместить пробный заряд Q_0 , то на него действует сила \vec{F} , которая, согласно закону Кулона, пропорциональна пробному заряду Q_0 . Поэтому отношение \vec{F}/Q_0 не зависит от величины Q_0 и характеризует электростатическое поле в той точке, где пробный заряд находится. Эта величина называется напряженностью и является силовой характеристикой электростатического поля.

Единица напряженности — **ньютон на кулон (Н/Кл)**: 1 Н/Кл равен напряженности электрического поля в точке, в которой

на точечный электрический заряд 1 Кл поле действует с силой 1 Н:

$$1 \text{ Н/Кл} = 1 \text{ В/м.}$$

Напряженность поля точечного заряда в вакууме:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2}.$$

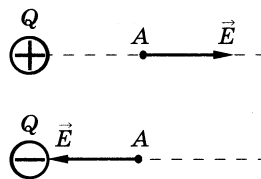


Рис. 82

Направление вектора \vec{E} совпадает с направлением силы, действующей на положительный заряд. Если поле создается положительным зарядом, то вектор \vec{E} направлен вдоль радиуса-вектора от заряда во внешнее пространство (отталкивание пробного положительного заряда); если поле создается отрицательным зарядом, то вектор \vec{E} направлен к заряду (рис. 82).

ОМА ЗАКОНЫ

Закон Ома для однородного участка цепи (не содержащего источника тока) (рис. 83): сила тока в проводнике прямо пропорциональна приложенному напряжению и обратно пропорциональна сопротивлению проводника:

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

Закон Ома для замкнутой цепи (рис. 84): сила тока в замкнутой цепи равна отношению ЭДС источника тока к суммарному сопротивлению всей цепи:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r},$$

где R — сопротивление внешней цепи, r — внутреннее сопротивление источника тока.

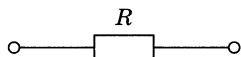


Рис. 83

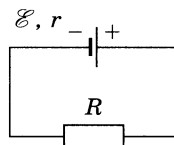


Рис. 84

Закон Ома для неоднородного участка цепи (участка цепи с источником тока) (рис. 85):

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}_{12}}{R + r},$$

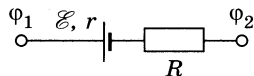


Рис. 85

где $(\varphi_1 - \varphi_2)$ — разность потенциалов на концах участка цепи, \mathcal{E}_{12} — ЭДС источника тока, входящего в участок.

Следствия из закона Ома для неоднородного участка цепи (обобщенного закона Ома):

1	Источника тока нет: $\mathcal{E}_{12} = 0$	$I = (\varphi_1 - \varphi_2)/R = U/R$	Закон Ома для однородного участка
2	Цепь замкнута: $\varphi_1 = \varphi_2$	$I = \mathcal{E}/R$ (R — сопротивление всей цепи)	Закон Ома для замкнутой цепи
3	Цепь разомкнута: $I = 0$	$\mathcal{E}_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$	ЭДС в разомкнутой цепи равна разности потенциалов на ее концах

ПОЛУПРОВОДНИКИ — вещества, удельная электропроводность (проводимость) которых при комнатной температуре имеет промежуточное значение между удельной проводимостью металлов ($10^6 - 10^4 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$) и диэлектриков ($10^{-8} - 10^{-12} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$). Характерной особенностью полупроводников (в отличие от металлов) является возрастание их проводимости с ростом температуры. Наличие в полупроводниках примеси существенно влияет на их проводимость (см. Примесная проводимость полупроводников).

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ДИОД — двухэлектродный полупроводниковый прибор с односторонней электрической проводимостью. Односторонняя проводимость контактов двух полупроводников (или металла с полупроводником) используется для выпрямления и преобразования переменных токов. Если имеется один электронно-дырочный переход, то его действие аналогично действию двухэлектродной лампы — диода. Поэтому полупроводниковое устройство, содержащее один $p-n$ -пере-

ход, называется **полупроводниковым диодом**. Полупроводниковые диоды по конструкции делятся на **точечные** и **плоскостные**.

На рис. 86, *а* представлен **точечный германиевый диод**, в котором тонкая вольфрамовая проволока *1* прижимается острием, покрытым алюминием, к германию *2*, имеющему *n*-проводимость. Если через диод в прямом направлении пропустить кратковременный импульс тока, то при этом резко повышается диффузия Al в Ge и образуется слой германия, обогащенный алюминием и обладающий *p*-проводимостью. На границе этого слоя образуется *p*—*n*-переход с высоким коэффициентом выпрямления. Благодаря малой емкости контактного слоя точечные диоды применяются в качестве детекторов (выпрямителей) высокочастотных колебаний вплоть до сантиметрового диапазона длин волн.

Принципиальная схема **плоскостного меднозакисного (купроксного) выпрямителя** дана на рис. 86, *б*. На медную пластину с помощью химической обработки наращивается слой закиси меди Cu_2O , который покрывается слоем серебра. Серебряный электрод служит только для включения выпрямителя в цепь. Часть слоя Cu_2O , прилегающая к меди и обогащенная ею, обладает электронной проводимостью, а часть слоя Cu_2O , прилегающая к серебру и обогащенная (в процессе изготовления выпрямителя) кислородом, — дырочной проводимостью. Таким образом, в толще закиси меди образуется запирающий слой с пропускным направлением тока от Cu_2O к Cu (*p* → *n*).

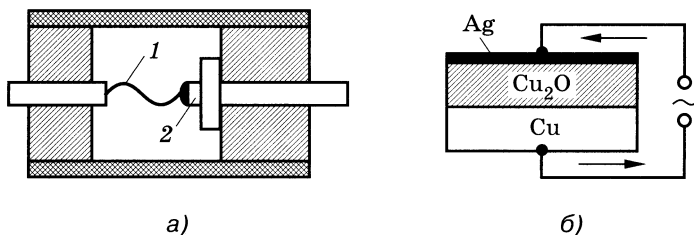


Рис. 86

Рассмотренные диоды обладают рядом преимуществ по сравнению с электронными лампами (малые габаритные размеры, высокие КПД и срок службы, постоянная готовность к работе и т. д.), но они очень чувствительны к температуре, поэтому интервал их рабочих температур ограничен (от -70 до $+120$ °С). $p-n$ -Переходы обладают не только прекрасными выпрямляющими свойствами, но могут быть использованы также для усиления электрических колебаний.

ПОЛЯРИЗАЦИЯ ДИЭЛЕКТРИКОВ — процесс ориентации диполей или появления под воздействием внешнего электрического поля ориентированных по полю диполей. Под действием внешнего электрического поля заряды неполярных молекул диэлектриков смещаются в противоположные стороны (положительные по полю, отрицательные против поля) и молекула приобретает дипольный момент. Под действием внешнего поля диполи полярных молекул диэлектриков стремятся повернуться вдоль поля и возникает отличный от нуля результирующий *дипольный момент*. Тепловое движение препятствует полной ориентации диполей, но под действием внешнего поля возникает *преимущественная ориентация* дипольных моментов по полю.

Таким образом, внесение обеих групп диэлектриков во внешнее электрическое поле приводит к возникновению отличного от нуля результирующего электрического момента диэлектрика, или, иными словами, к *поляризации диэлектрика*.

Внесем в однородное внешнее электрическое поле, созданное двумя бесконечными параллельными разноименно заряженными плоскостями, пластинку из однородного диэлектрика, расположив ее так, как показано на рис. 87. Под действием поля диэлектрик поляризуется, т. е. происходит смещение зарядов: положительные смещаются по полю, отрицательные — против поля. В результате этого на правой грани диэлектрика, обращенного к отрицательной плоскости, будет избыток положительного заряда с

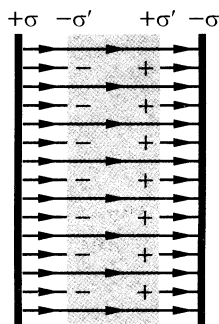


Рис. 87

поверхностной плоскостью $+\sigma'$, на левой — отрицательного заряда с поверхностной плоскостью $-\sigma'$. Эти нескомпенсированные заряды, появляющиеся в результате поляризации диэлектрика, называются **связанными (поляризационными)**. Суммарный заряд в объеме диэлектрика остается равным нулю.

$\sigma' < \sigma$ (σ — плотность свободных зарядов плоскостей). Появление связанных зарядов приводит к возникновению дополнительного электрического поля (поля, создаваемого *связанными* зарядами), которое направлено против внешнего поля (поля, создаваемого *свободными* зарядами) и ослабляет его. Следовательно, *поляризация диэлектрика вызывает уменьшение в нем поля по сравнению с первоначальным внешним полем*. Поэтому **диэлектрическую проницаемость среды** можно определить (см. также **К у л о н а з а к о н**) как безразмерную физическую величину, показывающую, во сколько раз модуль напряженности E_0 электрического поля в вакууме больше модуля напряженности E электрического поля в однородном диэлектрике:

$$\varepsilon = \frac{E_0}{E}.$$

ПОТЕНЦИАЛ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ. Если в поле, создаваемое зарядом Q , поместить заряд Q_0 , то его потенциальная энергия на расстоянии r от заряда Q будет равна:

$$W = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{QQ_0}{r},$$

откуда вытекает, что отношение W/Q_0 не зависит от Q_0 и является поэтому *энергетической характеристикой электростатического поля*, называемой потенциалом:

$$\varphi = \frac{W}{Q_0}.$$

Потенциал φ в какой-либо точке электростатического поля есть физическая величина, определяемая потенциальной энергией единичного положительного заряда, помещенного в эту точку.

Единица потенциала — **вольт (В)**: 1 В равен потенциалу точки поля, в которой заряд 1 Кл обладает потенциальной энергией 1 Дж. 1 В = 1 Дж/Кл.

Из вышеприведенных формул следует, что **потенциал электростатического поля точечного заряда Q** на расстоянии r от него (*в вакууме*):

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{Q}{r}.$$

Если поле создается несколькими зарядами, то потенциал поля системы зарядов равен *алгебраической* сумме потенциалов полей всех этих зарядов:

$$\varphi = \sum_{i=1}^n \varphi_i.$$

ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ ЗАРЯДА Q_0 В ПОЛЕ ЗАРЯДА Q . Тело, находящееся в потенциальном поле сил (а электростатическое поле является потенциальным), обладает потенциальной энергией, за счет которой силами поля совершается работа. Работа консервативных сил совершается за счет убыли потенциальной энергии (см. *Потенциальная энергия* в разделе «Механика»). Поэтому работу сил электростатического поля можно представить как разность потенциальных энергий, которыми обладает точечный заряд Q_0 в начальной и конечной точках поля заряда Q :

$$A_{12} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{QQ_0}{r_1} - \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{QQ_0}{r_2} = W_1 - W_2,$$

откуда следует, что потенциальная энергия заряда Q_0 , находящегося в поле заряда Q на расстоянии r от него, равна:

$$W = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{QQ_0}{r}$$

(здесь считается, что при $r \rightarrow \infty$ $W \rightarrow 0$). Для одноименных зарядов $Q_0Q > 0$ и потенциальная энергия их взаимодействия (отталкивания) положительна, для разноименных зарядов $Q_0Q < 0$ и потенциальная энергия их взаимодействия (притяжения) отрицательна.

ПРИМЕСНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ — проводимость, обусловленная примесями (атомы посторонних элементов), а также дефектами: тепловыми (пустые узлы или атомы в междоузлиях) и механическими (трещины, дислокации и т. д.). Наличие в полупроводнике примеси существенно изменяет его проводимость. Например, при введении в кремний примерно 0,001 % атомов бора его проводимость увеличивает­ся примерно в 10^6 раз.

Рассмотрим, что происходит при замещении четырехвалентного атома германия пятивалентным атомом мышьяка (рис. 88, а). При этом один электрон не может образовать ковалентной связи, он оказывается лишним и может быть легко при тепловых колебаниях решетки отщеплен от атома, т. е. стать свободным. Образование свободного электрона не сопровождается нарушением ковалентной связи; следовательно, дырка не возникает. Избыточный положительный заряд, возникающий вблизи атома примеси, связан с атомом примеси и поэтому перемещаться по решетке не может. Таким образом, в полупроводниках с примесью, валентность которой *на единицу больше валентности основных атомов, носителями тока являются электроны*; возникает **электронная проводимость (проводимость n-типа)**. Полупроводники с такой проводимостью называются **полупроводниками n-типа**.

Предположим, что в решетку четырехвалентного кремния введен примесный атом с тремя валентными электронами, например бор (рис. 88, б). Для образования связей с четырьмя ближайшими соседями у атома бора не хватает одного электрона, одна из связей остается неукомплектованной и четвертый электр-

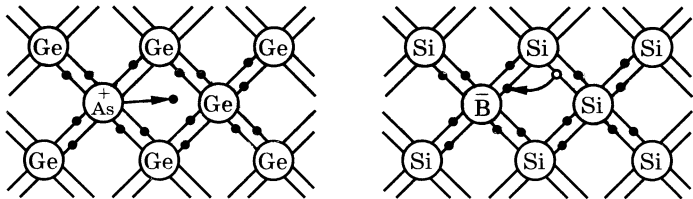


Рис. 88

а)

б)

рон может быть захвачен от соседнего атома основного вещества, где соответственно образуется дырка. Последовательное заполнение образующихся дырок электронами эквивалентно движению дырок в полупроводнике, т. е. дырки не остаются локализованными, а перемещаются в решетке кремния как свободные положительные заряды. Избыточный же отрицательный заряд, возникающий вблизи атома примеси, связан с атомом примеси и по решетке перемещаться не может. Таким образом, в полупроводниках с примесью, *валентность которой на единицу меньше валентности основных атомов, носителями тока являются дырки*; возникает **дырочная проводимость (проводимость р-типа)**. Полупроводники с такой проводимостью называются **полупроводниками р-типа**.

В отличие от *собственной проводимости, осуществляющейся одновременно электронами и дырками, примесная проводимость полупроводников обусловлена в основном носителями одного знака: электронами — в случае полупроводников n-типа, дырками — в случае полупроводников р-типа*.

ПРИНЦИП СУПЕРПОЗИЦИИ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ: магнитная индукция результирующего поля, создаваемого несколькими токами или движущимися зарядами, равна геометрической сумме магнитных индукций складываемых полей, создаваемых каждым током или движущимся зарядом в отдельности:

$$\vec{B} = \sum_{i=1}^n \vec{B}_i.$$

ПРИНЦИП СУПЕРПОЗИЦИИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ. Опыт показывает, что к кулоновским силам применим рассмотренный в механике принцип независимости действия сил, т. е. результирующая сила \vec{F} , действующая со стороны поля на пробный заряд Q_0 , равна векторной сумме сил \vec{F}_i , приложенных к нему со стороны каждого из зарядов Q_i :

$$\vec{F} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i. \quad (1)$$

Поскольку $\vec{F} = Q_0 \vec{E}$ и $\vec{F}_i = Q_0 \vec{E}_i$, где \vec{E} — напряженность результирующего поля, а \vec{E}_i — напряженность поля, создаваемого зарядом Q_i , то, подставляя последние выражения в формулу (1), получаем

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i.$$

Эта формула выражает **принцип суперпозиции (наложения) электростатических полей**: напряженность \vec{E} результирующего поля, создаваемого системой зарядов, равна *геометрической сумме* напряженностей полей, создаваемых в данной точке каждым из зарядов в отдельности.

Принцип суперпозиции позволяет рассчитать электростатические поля любой системы неподвижных зарядов, поскольку если заряды не точечные, то их можно всегда свести к совокупности точечных зарядов.

ПРОВОДНИКИ — тела (вещества), в которых может происходить упорядоченное движение заряженных частиц, т. е. тела, хорошо проводящие электрический ток.

Проводники делят на две группы:

проводники первого рода — все металлы (перенесение в них зарядов — свободных электронов — не сопровождается химическими превращениями);

проводники второго рода — электролиты, например расплавленные соли, растворы кислот (перенесение в них зарядов — положительных и отрицательных ионов — ведет к химическим превращениям).

ПРОВОДНИКИ В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ. Если поместить проводник во внешнее электростатическое поле, то заряды в проводниках начнут перемещаться. Перемещение зарядов (ток) продолжается до тех пор, пока не установится равновесное распределение зарядов, при котором *электростатическое поле внутри проводника обращается в нуль*. Это происходит в течение очень короткого времени. В самом деле, если бы поле не было равно нулю, то в проводнике возникло бы упорядоченное движение зарядов без затраты энергии от внешнего источни-

ка, что противоречит закону сохранения энергии. Итак, напряженность поля во всех точках внутри проводника равна нулю:

$$\vec{E} = 0.$$

Потенциал во всех точках *внутри проводника* постоянен:

$$\varphi = \text{const},$$

т. е. поверхность проводника в электростатическом поле является эквипотенциальной. Отсюда же следует, что вектор напряженности поля на внешней поверхности проводника направлен по нормали к каждой точке его поверхности. Если бы это было не так, то под действием касательной составляющей \vec{E} заряды начали бы по поверхности проводника перемещаться, что, в свою очередь, противоречило бы равновесному распределению зарядов.

На рис. 89 для примера показаны линии напряженности (штриховые линии) и эквипотенциальные поверхности (сплошные линии) поля заряженного проводника.

Электрические заряды располагаются на поверхности проводника. Поверхностная плотность зарядов зависит от формы проводника и различна в разных его точках.

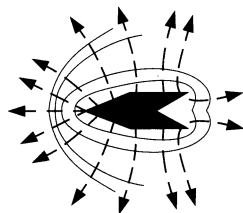


Рис. 89

РАБОТА И МОЩНОСТЬ ТОКА. Работа тока во внешней части цепи

$$A = IUt = I^2Rt = \frac{U^2}{R}t,$$

где I — сила тока в цепи, U — напряжение на участке цепи, R — сопротивление, t — время.

Если ток проходит по *неподвижному* металлическому проводнику, то вся работа тока идет на его нагревание и, по закону сохранения энергии,

$$Q = A.$$

Используя это выражение, получим

$$Q = IUt = I^2Rt = \frac{U^2}{R}t \text{ — это закон Джоуля—Ленца,}$$

где Q — количество теплоты, выделяющееся на участке цепи за время t .

Мощность тока

$$P = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R}.$$

Если сила тока выражается в амперах, напряжение — в вольтах, сопротивление — в омах, то *работа тока* выражается в джоулях, а *мощность* — в ваттах.

РАБОТА СИЛ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ. Работа при перемещении точечного заряда Q_0 из точки 1 в точку 2 в электростатическом поле точечного заряда Q :

$$A_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{QQ_0}{r_1} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{QQ_0}{r_2},$$

где r_1 и r_2 — соответственно расстояния от точек 1 и 2 до заряда Q (рис. 90). Работа сил электростатического поля, таким образом, не зависит от траектории перемещения, а определяется только положениями начальной и конечной точек. Следовательно, электростатическое поле точечного заряда является потенциальным, а электростатические силы — консервативными. Работа, совершаемая при перемещении электрического заряда во внешнем электростатическом поле по любому замкнутому пути, равна нулю.

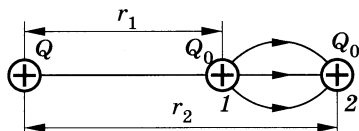


Рис. 90

РАЗНОСТЬ ПОТЕНЦИАЛОВ. Работа сил электростатического поля при перемещении точечного заряда Q_0 из точки 1 в точку 2 равна изменению его потенциальной энергии:

$$A_{12} = W_1 - W_2.$$

Так как потенциал электростатического поля $\varphi = W/Q_0$, то

$$A_{12} = Q_0(\varphi_1 - \varphi_2),$$

т. е. равна произведению перемещаемого заряда на разность потенциалов в начальной и конечной точках. **Разность потенциалов** двух точек 1 и 2 в электростатическом поле определя-

ется работой, совершаемой силами поля, при перемещении *единичного* положительного заряда из точки 1 в точку 2:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{12}}{Q_0}.$$

При решении конкретных задач *физический смысл* имеет именно разность потенциалов между двумя точками электростатического поля.

Единица разности потенциалов такая же, как и единица потенциала электростатического поля, — вольт (В).

СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ — свойство некоторых проводников (материалов), заключающееся в том, что их электрическое сопротивление при температуре ниже некоторого *критического* значения *скачком* уменьшается до нуля, т. е. материал становится абсолютным проводником. Сверхпроводимость наблюдается при очень низких температурах. Так, температура перехода в сверхпроводящее состояние для урана — 0,8 К, алюминия — 1,2 К, нитрата ниобия — 15,2 К.

Явление сверхпроводимости объясняется на основе квантовой теории. Практическое использование сверхпроводящих материалов (в обмотках сверхпроводящих магнитов, в системах памяти ЭВМ и др.) затруднено из-за их низких критических температур. В настоящее время обнаружены и активно исследуются керамические материалы, обладающие сверхпроводимостью при температуре 132 К.

СВЯЗЬ МЕЖДУ НАПРЯЖЕННОСТЬЮ И ПОТЕНЦИАЛОМ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ. Найдем взаимосвязь между напряженностью электростатического поля, являющейся его *силовой характеристикой*, и потенциалом — *энергетической характеристикой поля*. Работа по перемещению положительного заряда Q_0 из одной точки в другую вдоль оси X (ось совпадает с направлением однородного поля \vec{E}) при условии, что точки расположены близко друг к другу и $x_2 - x_1 = \Delta x$,

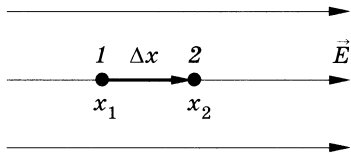


Рис. 91

равна $F\Delta x = Q_0 E \Delta x$ (рис. 91). С другой стороны, та же работа равна $Q_0(\varphi_1 - \varphi_2) = -Q_0 \Delta\varphi$. Приравняв правые части этих уравнений, можно записать

$$E = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta x},$$

т. е. в случае однородного поля напряженность равна отношению разности потенциалов между двумя точками поля, лежащими на одной и той же линии напряженности, к расстоянию между этими точками, взятому со знаком минус. Знак минус показывает, что *вектор напряженности \vec{E} направлен в сторону убывания потенциала*.

СОБСТВЕННАЯ ПРОВОДИМОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ — проводимость химически чистых полупроводников (Ge, Se).

Одним из наиболее широко распространенных полупроводниковых элементов является германий, имеющий решетку типа алмаза, в которой каждый атом связан ковалентными связями с четырьмя ближайшими соседями. Упрощенная плоская схема расположения атомов в кристалле Ge дана на рис. 92, где каждая черточка обозначает связь, осуществляемую одним электроном. В идеальном кристалле при 0 К такая структура представляет собой диэлектрик, так как все валентные электроны участвуют в образовании связей и, следовательно, не участвуют в проводимости.

При повышении температуры (или под действием других внешних факторов) тепловые колебания решетки могут привести к разрыву некоторых валентных связей, в результате чего часть электронов отщепляется и они становятся свободными. В покинутом электроном месте возникает *дырка* (она изображена белым кружком), заполнить которую могут электроны из соседней пары. В результате дырка, так же как и освободившийся электрон, будет двигаться по кристаллу. Движение электронов и дырок в отсутствие электрического поля является хаотиче-

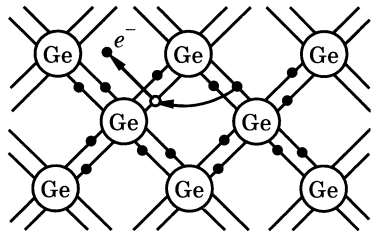


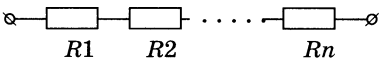
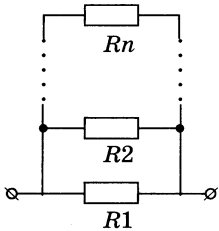
Рис. 92

ским. Если же на кристалл наложить электрическое поле, то электроны начнут двигаться против поля, дырки — по полю, что приведет к возникновению собственной проводимости германия, обусловленной как электронами, так и дырками. Таким образом, в данном случае наблюдается *два механизма проводимости: электронный и дырочный.*

СОЕДИНЕНИЕ КОНДЕНСАТОРОВ В БАТАРЕИ. Для увеличения электрической емкости и варьирования ее возможных значений конденсаторы соединяют в батарее, используя параллельное или последовательное соединение.

Соединение	Параллельное	Последовательное
Схема		
Сохраняющаяся величина	$U = U_1 = U_2 = \dots = U_n = \text{const}$	$Q = Q_1 = Q_2 = \dots = Q_n = \text{const}$
Суммируемые величины	$Q = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n$	$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$
Результирующая емкость	$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n;$ $C = \sum_{i=1}^n C_i$	$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n};$ $\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}$

СОЕДИНЕНИЕ ПРОВОДНИКОВ. Наиболее распространенными видами соединения проводников в электрических цепях являются последовательное и параллельное соединения.

Соединение	Последовательное	Параллельное
Схема		
Сохраняющаяся величина	$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n = \text{const}$	$U = U_1 = U_2 = \dots = U_n = \text{const}$
Суммируемые величины	$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$	$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n$
Результирующее сопротивление	$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n;$ $R = \sum_{i=1}^n R_i$	$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n};$ $\frac{1}{R} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}$

СОЛЕНОИД — свернутый в спираль изолированный проводник, по которому течет электрический ток. На рис. 93 показаны линии магнитной индукции поля соленоида. **Магнитное поле** внутри соленоида (см. также **Линии магнитной индукции**) **однородно**, т. е. магнитная индукция во всех его точках одинакова.

Индукция магнитного поля внутри соленоида (*без сердечника*)

$$B = \mu_0 \frac{NI}{l},$$

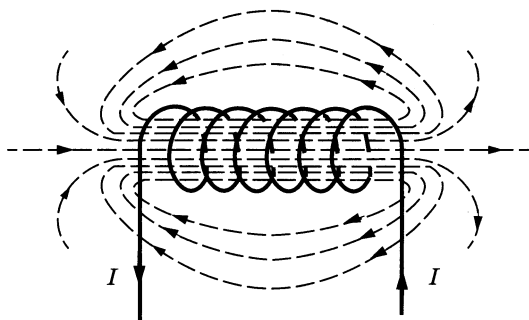


Рис. 93

где N — число витков, l — длина соленоида, I — сила тока, текущего в соленоиде, μ_0 — магнитная постоянная.

СОПРОТИВЛЕНИЕ ПРОВОДНИКОВ — физическая величина, характеризующая противодействие проводника или электрической цепи электрическому току.

Единица сопротивления — **ом** (Ом): 1 Ом — сопротивление такого проводника, в котором при напряжении 1 В течет постоянный ток 1 А.

Величина

$$G = \frac{1}{R}$$

называется **электрической проводимостью** проводника. *Единица* проводимости — **сименс** (См): 1 См — проводимость участка цепи сопротивлением 1 Ом.

Сопротивление проводников зависит от его размеров и формы, а также от материала, из которого проводник изготовлен. Для цилиндрического проводника сопротивление R прямо пропорционально его длине l и обратно пропорционально площади его поперечного сечения S :

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

где ρ — коэффициент пропорциональности, характеризующий материал проводника и называемый **удельным электрическим сопротивлением**. *Единица* удельного электрического сопротивления — **ом-метр** (Ом · м): 1 Ом-метр равен удельному электри-

ческому сопротивлению проводника площадью поперечного сечения 1 м^2 и длиной 1 м , имеющего сопротивление 1 Ом .

Наименьшим удельным сопротивлением обладают серебро ($1,6 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$) и медь ($1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$). На практике наряду с медными применяются алюминиевые провода. Хотя алюминий и имеет большее, чем медь, удельное сопротивление ($2,6 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$), но зато обладает меньшей плотностью по сравнению с медью.

Опыт показывает, что в первом приближении изменение удельного сопротивления, а значит, и сопротивления, с температурой описывается линейным законом:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t), \quad R = R_0(1 + \alpha t),$$

где ρ и ρ_0 , R и R_0 — соответственно удельные сопротивления и сопротивления проводника при t и $t_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$, α — *температурный коэффициент сопротивления*, для чистых металлов (при не очень низких температурах) близкий к $1/273 \text{ К}^{-1}$.

На зависимости электрического сопротивления металлов от температуры основано действие **термометров сопротивления**, которые позволяют по градуированной взаимосвязи сопротивления от температуры измерять температуру с точностью до $0,003 \text{ К}$. Термометры сопротивления, в которых в качестве рабочего вещества используются полупроводники, изготовленные по специальной технологии, называются **термисторами**. Они позволяют измерять температуры с точностью до миллионных долей кельвина.

СТОРОННИЕ СИЛЫ. Если в цепи на носители тока действуют *только* силы электростатического поля, то происходит перемещение носителей (они предполагаются положительными) от точек с большим потенциалом к точкам с меньшим потенциалом. Это приведет к выравниванию потенциалов во всех точках цепи и к исчезновению электрического поля. Поэтому для существования постоянного тока необходимо наличие в цепи устройства, способного создавать и поддерживать разность потенциалов за счет работы сил неэлектростатического происхождения. Такие устройства называются **источниками тока**. Силы *неэлектро-*

статического происхождения, действующие на заряды со стороны источников тока, называются **сторонними**.

Природа сторонних сил может быть различной. Например, в гальванических элементах они возникают за счет энергии химических реакций между электродами и электролитами; в генераторе — за счет механической энергии вращения ротора генератора и т. п. Роль источника тока в электрической цепи, образно говоря, такая же, как роль насоса, который необходим для перекачивания жидкости в гидравлической системе. Под действием создаваемого поля сторонних сил электрические заряды движутся *внутри источника тока против сил электростатического поля*, благодаря чему на концах цепи поддерживается разность потенциалов и в цепи течет постоянный электрический ток.

УДЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ (ПРОВОДИМОСТЬ) — величина, обратная удельному электрическому сопротивлению

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

Единица удельной электропроводности — **сименс на метр** (См/м): 1 См/м равен удельной электропроводности (проводимости) проводника, который при площади поперечного сечения 1 м^2 и длине 1 м имеет электрическую проводимость 1 См.

ФАРАДЕЯ ЗАКОН ДЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ. Обобщая результаты опытов (см. *Фарадея классические опыты*), Фарадей показал, что всякий раз, когда происходит изменение сцепленного с контуром потока магнитной индукции, в контуре возникает индукционный ток; возникновение индукционного тока указывает на наличие в цепи электродвижущей силы, называемой **электродвижущей силой электромагнитной индукции**.

Закон Фарадея (закон электромагнитной индукции): ЭДС электромагнитной индукции \mathcal{E}_i в контуре численно равна и противоположна по знаку скорости изменения магнитного потока сквозь поверхность, ограниченную этим контуром:

$$\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad \text{или} \quad \mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt}.$$

Знак минус определяется правилом Ленца — общим правилом для нахождения индукционного тока.

Закон Фарадея может быть выведен из закона сохранения энергии: работа источника тока за время dt ($\mathcal{E}Idt$) будет складываться из работы по нагреванию проводника (I^2Rdt) и работы по перемещению проводника в магнитном поле ($Id\Phi$):

$$\mathcal{E}Idt = I^2Rdt + Id\Phi,$$

где R — полное сопротивление контура. Тогда

$$I = \frac{\mathcal{E} - \frac{d\Phi}{dt}}{R},$$

где $-\frac{d\Phi}{dt} = \mathcal{E}_i$ есть не что иное, как закон Фарадея.

Закон Фарадея универсален: ЭДС \mathcal{E}_i не зависит от способа изменения магнитного потока. ЭДС электромагнитной индукции выражается в вольтах. Действительно,

$$\left[\frac{d\Phi}{dt} \right] = \frac{\text{Вб}}{\text{с}} = \frac{\text{Тл} \cdot \text{м}^2}{\text{с}} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{А} \cdot \text{м} \cdot \text{с}} = \frac{\text{Дж}}{\text{А} \cdot \text{с}} = \frac{\text{А} \cdot \text{В} \cdot \text{с}}{\text{А} \cdot \text{с}} = \text{В}.$$

ФИЗИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ В ЭЛЕКТРОДИНАМИКЕ

Точечный заряд — заряд, сосредоточенный на теле, линейные размеры которого пренебрежимо малы по сравнению с расстоянием до других заряженных тел, с которыми он взаимодействует. Понятие точечного заряда, как и материальной точки, является *физической абстракцией*.

ФАРАДЕЯ КЛАССИЧЕСКИЕ ОПЫТЫ. Связь магнитного поля с током привела к многочисленным попыткам возбудить ток в контуре с помощью магнитного поля. Эта фундаментальная задача была решена М. Фарадеем, открывшим явление **электромагнитной индукции**. Оно заключается в том, что в замкнутом проводящем контуре при изменении потока магнитной индукции, охватываемого этим контуром, возникает электрический ток, получивший название **индукционного**. Опыты Фарадея

сыграли столь огромную роль в обнаружении явления электромагнитной индукции, что требуют отдельного рассмотрения.

I серия опытов (рис. 94, а). Если в замкнутом на гальванометр соленоиде перемещать постоянный магнит, то в моменты его вдвигания или выдвигания наблюдается отклонение стрелки гальванометра (возникает индукционный ток); направления отклонений стрелки при вдвигании и выдвигании магнита противоположны. Отклонение стрелки гальванометра тем больше, чем больше скорость движения магнита относительно катушки. При изменении полюсов магнита направление отклонения стрелки изменится. Для получения индукционного тока магнит можно оставлять неподвижным, тогда нужно относительно магнита передвигать соленоид.

II серия опытов (рис. 94, б). Концы одной из катушек, вставленных одна в другую, присоединяются к гальванометру, а через другую катушку пропускается ток. Отклонение стрелки гальванометра наблюдается в моменты включения или выключения тока, в моменты его увеличения или уменьшения или при перемещении катушек друг относительно друга. Направления отклонений стрелки гальванометра также противоположны при включении или выключении тока, его увеличении или уменьшении, сближении или удалении катушек.

Обобщая результаты опытов, Фарадей пришел к выводу, что индукционный ток возникает всегда, когда происходит из-

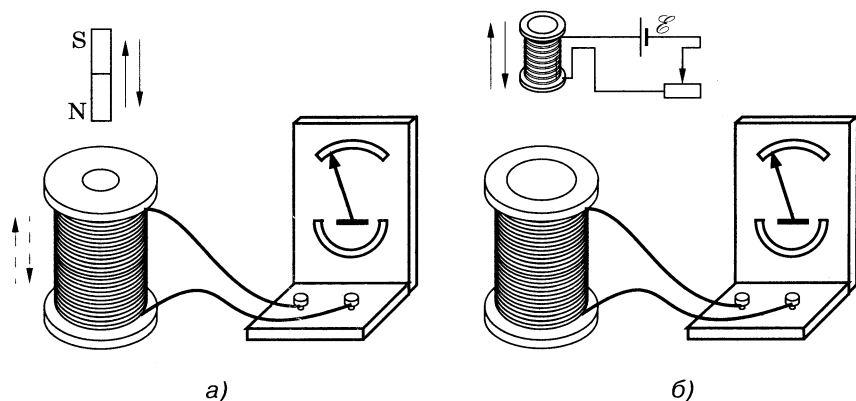


Рис. 94

менение сцепленного с контуром потока магнитной индукции. Например, при повороте в однородном магнитном поле замкнутого проводящего контура в нем также возникает индукционный ток. В данном случае индукция магнитного поля вблизи проводника остается постоянной, а меняется только поток магнитной индукции сквозь контур.

Опытным путем было также установлено, что значение индукционного тока совершенно не зависит от способа изменения потока магнитной индукции, а определяется лишь скоростью его изменения (в опытах Фарадея также доказывается, что отклонение стрелки гальванометра (сила тока) тем больше, чем больше скорость движения магнита, или скорость изменения силы тока, или скорость движения катушек).

ЭДС ИНДУКЦИИ В ДВИЖУЩИХСЯ ПРОВОДНИКАХ. Если отрезок проводника длиной l (рис. 95) движется в однородном магнитном поле со скоростью \vec{v} , то ЭДС электромагнитной индукции в проводнике

$$\mathcal{E}_i = Blv \sin \alpha,$$

где B — магнитная индукция, α — угол между векторами \vec{B} и \vec{v} .

В данном случае при движении проводника его свободные заряды движутся вместе с проводником. На движущиеся заряды со стороны магнитного поля действует сила Лоренца, которая и вызывает перемещение зарядов внутри проводника. Это означает, что действие силы Лоренца на заряды проводника аналогично действию некоего электрического поля, создаваемого не кулоновскими силами, а силами магнитного происхождения.

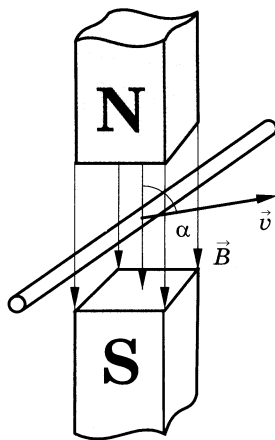


Рис. 95

ЭКВИПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ — поверхности, во всех точках которых потенциал имеет одно и то же значение. Используются для графического изображения распределения потенциала электростатического поля.

Потенциал поля точечного заряда

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r}.$$

Следовательно, эквипотенциальные поверхности в данном случае — концентрические сферы. С другой стороны, линии напряженности в случае точечного заряда — радиальные прямые. Следовательно, линии напряженности в случае точечного заряда *перпендикулярны* эквипотенциальным поверхностям.

Вектор напряженности \vec{E} *всегда* перпендикулярен эквипотенциальным поверхностям и *всегда* направлен в сторону убывания потенциала.

Эквипотенциальных поверхностей вокруг каждого заряда и каждой системы зарядов можно провести бесчисленное множество. Однако их обычно проводят так, чтобы *разности потенциалов между любыми двумя соседними эквипотенциальными поверхностями были одинаковы*. Тогда густота эквипотенциальных поверхностей наглядно характеризует напряженность поля в разных точках. Там, где эти поверхности расположены гуще, напряженность поля больше.

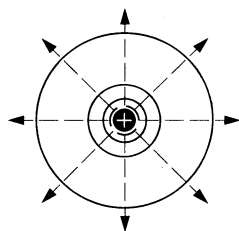


Рис. 96

На рис. 96 для примера показаны линии напряженности (штриховые линии) и сечения эквипотенциальных поверхностей (сплошные линии) поля положительного точечного заряда.

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЕМКОСТЬ ПЛОСКОГО КОНДЕНСАТОРА. Конденсатор — устройство, способное при малых размерах и небольших относительно окружающих тел потенциалах накапливать значительные по величине заряды, иными словами, обладать большой электроемкостью.

Конденсатор состоит из двух проводников (обкладок) с одинаковыми по модулю, но противоположными по знаку зарядами, форма и расположение которых таковы, что поле сосредоточено в узком зазоре между обкладками. В случае **плоского конденсатора** обкладки

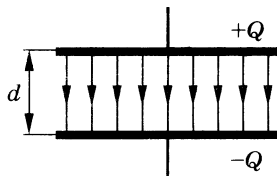


Рис. 97

представляют собой две параллельные плоские пластины (рис. 97).

Емкость плоского конденсатора — физическая величина, определяемая зарядом, накопленным на одной из обкладок конденсатора при разности потенциалов 1 В между его обкладками:

$$C = \frac{Q}{\varphi_1 - \varphi_2}.$$

Рассчитаем электрическую емкость плоского конденсатора. Учитывая, что $\varphi_1 - \varphi_2 = Ed$ (E — напряженность поля между пластинами конденсатора, d — расстояние между пластинами), $E = Q/(\varepsilon_0 \varepsilon S)$ (см. Электрическое поле двух бесконечных параллельных разноименно заряженных плоскостей), и подставив эти выражения в формулу для емкости плоского конденсатора, получим

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d},$$

где ε — диэлектрическая проницаемость среды, S — площадь пластин.

Электрическая емкость (емкость) — характеристика проводника, определяющая его способность накапливать электрический заряд при данном потенциале.

Рассмотрим **уединенный проводник** — проводник, который удален от других проводников, тел и зарядов. Емкость уединенного проводника определяется зарядом, который необходимо сообщить проводнику, чтобы изменить его потенциал на единицу:

$$C = \frac{Q}{\varphi}. \quad (1)$$

Емкость проводника определяется его размерами и формой, но не зависит от материала, агрегатного состояния, формы и размеров полостей внутри проводника. Это связано с тем, что избыточные заряды распределяются на внешней по-

верхности проводника. Емкость не зависит также от заряда и потенциала проводника.

Единица емкости — **фарад (Ф)**: 1 Ф — емкость такого уединенного проводника, потенциал которого изменяется на 1 В при сообщении ему заряда 1 Кл.

Потенциал уединенного шара радиуса R в вакууме

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{R}. \quad (2)$$

Подставив выражение (2) в формулу (1), получим, что емкость шара в вакууме

$$C = 4\pi\epsilon_0 R.$$

Отсюда следует, что емкостью 1 Ф обладал бы уединенный шар, находящийся в вакууме и имеющий радиус $R = C/(4\pi\epsilon_0) \approx 9 \cdot 10^6$ км, что примерно в 1400 раз больше радиуса Земли (емкость Земли $C \approx 0,7$ мФ). Следовательно, фарад — очень большая величина, поэтому на практике используются дольные единицы — миллифарад (мФ), микрофарад (мкФ), нанофарад (нФ), пикофарад (пФ).

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДИПОЛЬ — система двух равных по модулю разноименных точечных зарядов ($+Q$, $-Q$), расстояние l между которыми значительно меньше расстояния до рассматриваемых точек поля. Вектор, направленный по оси диполя (прямой, проходящей через оба заряда) от отрицательного заряда к положительному и равный расстоянию между ними, называется **плечом диполя** \vec{l} . Вектор

$$\vec{p} = |Q|\vec{l},$$

совпадающий по направлению с плечом диполя и равный произведению заряда $|Q|$ на плечо \vec{l} , называется **электрическим моментом диполя (дипольным моментом)** (рис. 98).

Согласно принципу суперпозиции напряженность \vec{E} поля диполя в произвольной точке равна:

$$\vec{E} = \vec{E}_+ + \vec{E}_-,$$

где \vec{E}_+ и \vec{E}_- — напряженности полей, создаваемых соответственно положительным и отрицательным зарядами.

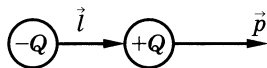


Рис. 98

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЗАРЯД, СВОЙСТВА. Электрический заряд — одна из основных характеристик тел или частиц, определяющая их способность к электромагнитным взаимодействиям. Несмотря на огромное разнообразие веществ в природе, существует только *два типа электрических зарядов*: заряды, подобные возникающим на стекле, потертом о кожу (их называли **положительными**), и заряды, подобные возникающим на эбоните, потертом о мех (их называли **отрицательными**); *одноименные заряды друг от друга отталкиваются, разноименные — притягиваются.*

Единица электрического заряда — **кулон (Кл)**: 1 Кл равен электрическому заряду, проходящему через поперечное сечение проводника при силе постоянного тока 1 А за время 1 с. $1 \text{ Кл} = 1 \text{ А} \cdot \text{с}$.

Элементарный электрический заряд — одна из основных *фундаментальных* постоянных, равная наименьшему по абсолютному значению из всех возможных положительных и отрицательных электрических зарядов:

$$e = 1,6021892(46) \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

(для расчетов $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл).

Носителем элементарного отрицательного заряда является **электрон** ($m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$ кг), носителем элементарного положительного заряда — **протон** ($m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$ кг). Электрические заряды электрона и протона по абсолютному значению равны $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Свойства электрических зарядов:

инвариантность (постоянство) — величина заряда не зависит от системы отсчета, т. е. не зависит от того, движется он или покоится;

дискретность — заряд любого тела составляет целое кратное от элементарного электрического заряда e ;

аддитивность — заряд любой системы тел (частиц) равен сумме зарядов тел (частиц), входящих в систему;

постоянство суммарного заряда замкнутой системы (закон сохранения заряда).

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ — форма проявления электромагнитного поля. Особенность электрического поля заключается в том, что оно создается электрическими зарядами и действует как на движущиеся, так и на неподвижные заряды. Частным случаем электрического поля является электростатическое поле.

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ БЕСКОНЕЧНОЙ ПРОВОДЯЩЕЙ ПЛОСКОСТИ.

Бесконечная плоскость заряжена с постоянной поверхностной плотностью $+\sigma$ (поверхностная плотность заряда — заряд, приходящийся на единицу поверхности). Линии напряженности перпендикулярны рассматриваемой плоскости и направлены от нее в обе стороны (рис. 99). Таким образом, напряженность электрического поля по каждую сторону от бесконечной плоскости одинакова как по направлению, так и по модулю (поле равномерно заряженной плоскости *однородно*).

Напряженность поля *равномерно* заряженной бесконечной плоскости

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} = \frac{Q}{2\epsilon_0 S}$$

($\sigma = Q/S$, S — площадь пластины).

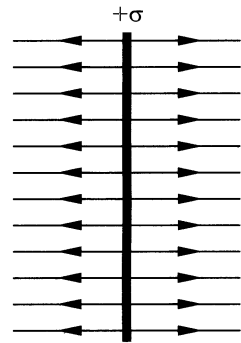


Рис. 99

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ ДВУХ БЕСКОНЕЧНЫХ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ РАЗНОИМЕННО ЗАРЯЖЕННЫХ ПЛОСКОСТЕЙ.

Плоскости заряжены равномерно разноименными зарядами с **поверхностными плотностями** $+\sigma$ и $-\sigma$. Поле таких плоскостей найдем как суперпозицию полей, создаваемых каждой из плоскостей в отдельности. На рис. 100 верхние стрелки соответствуют полю от положительно заряженной плоскости, нижние — от отрицательной плоскости. Слева и справа от плоскостей поля вычитаются (линии напряженности направлены навстречу друг другу), поэтому здесь напряженность поля

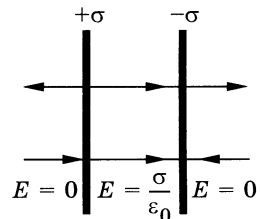


Рис. 100

$E = 0$. В области между плоскостями $E = E_+ + E_-$ (E_+ и E_- определяются по формуле $E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}$), поэтому результирующая напряженность

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} = \frac{Q}{\varepsilon_0 S}. \quad (1)$$

Таким образом, результирующая напряженность поля в области между плоскостями описывается формулой (1), а вне объема, ограниченного плоскостями, равна нулю.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК, ХАРАКТЕРИСТИКИ. Электрический ток — любое упорядоченное (направленное) движение электрических зарядов.

Для возникновения и поддержания электрического тока необходимо, с одной стороны, наличие свободных **носителей тока** — заряженных частиц, способных перемещаться упорядоченно, а с другой — *наличие электрического поля*, энергия которого, каким-то образом восполняясь, расходовалась бы на их упорядоченное движение. За направление тока условно принимают направление движения *положительных зарядов*.

В проводнике под действием приложенного электрического поля \vec{E} свободные электрические заряды перемещаются: положительные — по полю, отрицательные — против поля (рис. 101, а), т. е. в проводнике возникает электрический ток, называемый **током проводимости**. Если же упорядоченное движение электрических зарядов осуществляется перемещением в пространстве заряженного макроскопического тела (рис. 101, б), то возникает так называемый **конвекционный ток**.

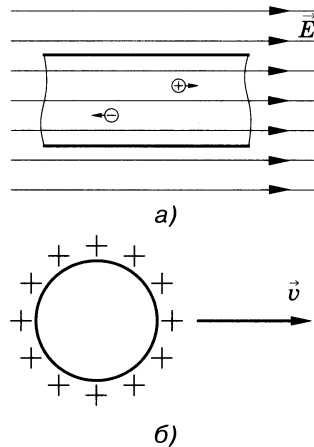


Рис. 101

Количественной мерой электрического тока служит **сила тока** I — скалярная физическая величина, определяемая электрическим зарядом, проходящим через поперечное сечение проводника в единицу времени:

$$I = \frac{dQ}{dt}.$$

Если сила тока и его направление со временем не изменяются, то такой **ток** называется **постоянным**. Для постоянного тока $I = Q/t$.

Единица силы тока — **ампер** (см. Единицы физических величин).

Физическая величина, определяемая силой тока, проходящего через единицу площади поперечного сечения проводника, перпендикулярного направлению тока, называется **плотностью тока**:

$$j = \frac{I}{S}.$$

Единица плотности тока — ампер на метр в квадрате ($\text{А}/\text{м}^2$): $1 \text{ А}/\text{м}^2$ равен плотности электрического тока, при которой сила тока, равномерно распределенного по поперечному сечению проводника площадью 1 м^2 , равна 1 А .

Если концентрация носителей тока равна n и каждый носитель имеет элементарный заряд e (что не обязательно для ионов), то за время dt через поперечное сечение S проводника переносится заряд $dQ = ne\langle v \rangle S dt$. Тогда сила тока

$$I = \frac{dQ}{dt} = ne\langle v \rangle S,$$

а плотность тока

$$\vec{j} = ne\langle \vec{v} \rangle.$$

Плотность тока — *вектор*, ориентированный по направлению тока, т. е. направление вектора \vec{j} совпадает с направлением упорядоченного движения положительных зарядов.

ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА (ЭДС). НАПРЯЖЕНИЕ. Сторонние силы совершают работу по перемещению электрических зарядов. Физическая величина, определяемая работой, совер-

шаемой сторонними силами при перемещении единичного положительного заряда, называется **электродвижущей силой** (ЭДС), действующей в цепи:

$$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{ст}}}{Q_0}, \quad (1)$$

где $A_{\text{ст}}$ — работа сторонних сил, Q_0 — единичный положительный заряд.

Единица ЭДС — такая же, как и единица потенциала электростатического поля, — **вольт (В)**.

Напряжение на участке $1-2$ — физическая величина, определяемая работой, совершаемой суммарным полем электростатических (кулоновских) и сторонних сил при перемещении единичного положительного заряда на данном участке цепи:

$$U_{12} = \frac{A_{12} + A_{\text{ст}}}{Q_0}, \quad (2)$$

где работа сил электростатического поля при перемещении заряда Q_0 из точки 1 в точку 2

$$A_{12} = Q_0(\varphi_1 - \varphi_2). \quad (3)$$

Подставив формулы (1) и (3) в выражение (2), получим, что напряжение на участке $1-2$, содержащем источник тока, равно сумме ЭДС источника и разности потенциалов на этом участке:

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}_{12}.$$

Понятие напряжения является обобщением понятия разности потенциалов: напряжение на концах участка цепи равно разности потенциалов в том случае, если на этом участке не действует ЭДС, т. е. сторонние силы отсутствуют.

Единица напряжения — такая же, как и единица потенциала электростатического поля, — **вольт (В)**.

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА, СТРУКТУРА — раздел учения об электричестве, в котором рассматриваются явления и процессы, обусловленные движением электрических зарядов или макроскопических заряженных тел.

Раздел электродинамики — **электростатика**, в котором изучается взаимодействие неподвижных зарядов.

ЭЛЕКТРОЛИЗ — выделение веществ на электродах, погруженных в *э л е к т р о л и т*, при прохождении по нему электрического тока.

В растворах (расплавах) электролитов нейтральные молекулы в результате **электролитической диссоциации** расщепляются на положительные и отрицательные ионы, которые в отсутствие электрического поля движутся хаотически. Под действием электрического поля положительные ионы (катионы) перемещаются к катоду, а отрицательные ионы (анионы) — к аноду; возникает направленное движение заряженных частиц — электрический ток.

Количественные закономерности электролиза описываются **законом Фарадея**: масса m вещества, выделившегося на электроде, пропорциональна заряду Q , прошедшему через электролит:

$$m = kQ \text{ или } m = kIt,$$

где k — **электрохимический эквивалент вещества** (величина, определяемая массой вещества, выделяющегося на электродах при прохождении через электролит заряда 1 Кл), I — сила тока, t — время пропускания тока через электролит.

ЭЛЕКТРОЛИТЫ — вещества, растворы и расплавы которых проводят электрический ток в результате движения ионов, образующихся при электролитической диссоциации. **Электролитическая диссоциация** — расщепление молекул электролита на положительные и отрицательные ионы под действием растворителя. Она характеризуется **степенью диссоциации** — отношением числа молекул, диссоциировавших на ионы, к общему числу молекул данного вещества. Степень диссоциации зависит от температуры, концентрации раствора и диэлектрической проницаемости растворителя.

Сопротивление электролитов прямо пропорционально высоте столба l , удельному сопротивлению электролита ρ и обратно пропорционально площади его поперечного сечения S :

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

удельное сопротивление электролитов

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t),$$

где $\alpha < 0$.

Проводимость электролитов — ионная, электролиты — класс проводников, в которых прохождение электрического тока связано с *переносом вещества*.

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКАЯ ИНДУКЦИЯ — перераспределение поверхностных зарядов на проводнике во внешнем электростатическом поле.

Если во внешнее электростатическое поле внести нейтральный проводник, то свободные заряды (электроны, ионы) будут перемещаться: положительные — по полю, отрицательные — против поля (рис. 102, а). На одном конце проводника будет скапливаться избыток положительного заряда, на другом — избыток отрицательного. Эти **заряды** называются **индуцированными**. Процесс будет происходить до тех пор, пока напряженность поля внутри проводника не станет равной нулю, а линии напряженности вне проводника — перпендикулярными его поверхности (рис. 102, б). Таким образом, нейтральный проводник, внесенный в электростатическое поле, разрывает часть линий напряженности; они заканчиваются на отрицательных индуцированных зарядах и вновь начинаются на положительных. Индуцированные заряды распределяются на внешней поверхности проводника.

Так как в состоянии равновесия внутри проводника заряды отсутствуют, то созданная внутри него полость не повлияет на конфигурацию расположения зарядов и тем самым на электростатическое поле. Следовательно, внутри полости поле будет

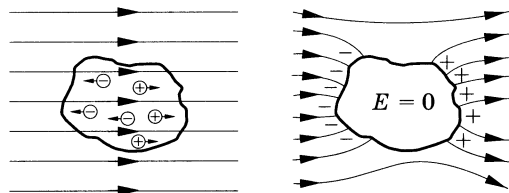


Рис. 102

а)

б)

отсутствовать. Если проводник с полостью заземлить, то потенциал во всех точках полости будет нулевым, т. е. полость полностью изолирована от влияния внешних электростатических полей. На этом основана **электростатическая защита** — экранирование тел, например измерительных приборов, от влияния внешних электростатических полей. Вместо сплошного проводника для защиты может быть использована густая металлическая сетка, которая, кстати, является эффективной при наличии не только постоянных, но и переменных электрических полей.

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ — поле, создаваемое неподвижными в данной системе отсчета электрическими зарядами. Электростатическое поле — не изменяющееся во времени (стационарное) э л е к т р и ч е с к о е п о л е.

Для обнаружения и опытного исследования электростатического поля используется **пробный точечный положительный заряд** — заряд, который не искажает исследуемое поле (не вызывает перераспределения зарядов, создающих поле). Количественные характеристики электростатического поля — **напряженность E и потенциал ϕ** .

ЭЛЕМЕНТАРНАЯ КЛАССИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ МЕТАЛЛОВ. Носителями тока в металлах являются свободные электроны, т. е. электроны, слабо связанные с ионами кристаллической решетки металла. Представление о природе носителей тока в металлах основывается на *электронной теории проводимости металлов*, созданной немецким физиком *П. Друде*, а также на ряде классических опытов, подтверждающих положения электронной теории.

Первый из таких опытов — **опыт Рикке**, в котором в течение года электрический ток пропускаться через три последовательно соединенных с тщательно отшлифованными торцами металлических цилиндра (Cu, Al, Cu) одинакового радиуса. В результате опыта выяснилось, что никаких (даже микроскопических) следов переноса вещества не обнаружилось: следовательно — *ионы в металлах не участвуют в переносе электричества, а перенос заряда в металлах осуществляется частицами, которые являются общими для всех металлов.*

Л. И. Мандельштам и Н. Д. Папалекси предположили, что если в металле имеются подвижные, слабо связанные с решеткой носители тока, то при резком торможении проводника эти частицы должны по инерции смещаться вперед, как смещаются вперед пассажиры, стоящие в вагоне при его торможении. Результатом смещения зарядов должен быть импульс тока; по направлению тока можно определить знак носителей тока, а зная размеры и сопротивление проводника, можно вычислить удельный заряд носителей. Таким образом было доказано, что носители тока в металлах — *свободные электроны*.

Согласно электронной **теории** проводимости металлов Друде в узлах кристаллической решетки располагаются ионы металла, а между ними хаотически движутся свободные электроны, образуя своеобразный электронный газ, обладающий свойствами идеального газа. Электроны проводимости при движении сталкиваются с ионами решетки, в результате чего устанавливается термодинамическое равновесие между электронным газом и решеткой. Электроны обладают такой же энергией теплового движения, как и молекулы одноатомного газа. Тепловое движение электронов, являясь хаотическим, не может привести к возникновению тока.

При наложении внешнего электрического поля на металлический проводник, кроме теплового движения электронов, возникает их упорядоченное движение, т. е. возникает электрический ток.

Отметим, что движение электронов в металлах, согласно теории Друде, описывается законами классической механики, хотя, как было доказано впоследствии, классическая механика неприменима для описания этого движения. Движение электронов в металлах подчиняется законам **квантовой механики**.

На основе элементарной классической теории электропроводности может быть объяснена природа электрического сопротивления металлов. Согласно этой теории сопротивление металлов обусловлено соударениями свободных электронов с ионами кристаллической решетки. Подвижность свободных

электронов с увеличением температуры уменьшается, сопротивление металлов при нагревании увеличивается.

ЭНЕРГИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ. Проводник, по которому протекает электрический ток, всегда окружен магнитным полем, причем магнитное поле появляется и исчезает вместе с появлением и исчезновением тока. Магнитное поле, подобно электрическому, является носителем энергии. Естественно предположить, что энергия магнитного поля равна работе, которая затрачивается током на создание этого поля.

Энергия магнитного поля, создаваемого током в замкнутом контуре индуктивностью L , по которому течет ток I , равна:

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

ЭНЕРГИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Уединенный заряженный проводник:

$$W = \frac{C\varphi^2}{2} = \frac{Q\varphi}{2} = \frac{Q^2}{2C},$$

где C , Q , φ — соответственно емкость, заряд, потенциал проводника.

Система неподвижных точечных зарядов:

$$W = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n Q_i \varphi_i,$$

где φ_i — потенциал, создаваемый в той точке, где находится заряд Q_i , всеми зарядами, кроме i -го.

Заряженный конденсатор:

$$W = \frac{C(\Delta\varphi)^2}{2} = \frac{Q\Delta\varphi}{2} = \frac{Q^2}{2C},$$

где $\Delta\varphi$ — разность потенциалов между обкладками конденсатора.

Подставив в последнее выражение формулу для электроемкости плоского конденсатора и выразив

разность потенциалов через напряженность поля ($\Delta\varphi = Ed$), получим

$$W = \frac{C(\Delta\varphi)^2}{2} = \frac{\varepsilon_0\varepsilon S}{d} \cdot \frac{E^2 d^2}{2} = \frac{\varepsilon_0\varepsilon E^2}{2} Sd = \frac{\varepsilon_0\varepsilon E^2}{2} V,$$

где E — напряженность электростатического поля в конденсаторе, $V = Sd$ — объем конденсатора. Последняя формула выражает энергию электростатического поля конденсатора через величину, характеризующую само поле, — **напряженность E** . Это свидетельствует о том, что энергия заряженного конденсатора сосредоточена в его электростатическом поле.

Объемная плотность энергии электростатического поля — энергия электростатического поля в единице объема:

$$w = \frac{W}{V} = \frac{\varepsilon_0\varepsilon E^2}{2}.$$

КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

АВТОКОЛЕБАНИЯ — *незатухающие колебания*, поддерживаемые в диссипативной системе за счет постоянного внешнего источника энергии, причем свойства этих колебаний определяются самой системой. **Диссипативная система** — система, в которой механическая энергия постепенно уменьшается за счет преобразования в другие (немеханические) формы энергии.

Автоколебания *принципиально* отличаются от свободных незатухающих колебаний, а также от вынужденных колебаний. Автоколебательная система сама управляет внешними воздействиями, обеспечивая согласованность поступления энергии определенными порциями в нужный момент времени (в такт ее колебаниям).

Примером автоколебательной системы могут служить часы. Храповой механизм подталкивает маятник в такт с его колебаниями. При этом энергия передается маятнику либо от раскручивающейся пружины, либо от опускающегося груза. Колебания воздуха в духовых инструментах и органных трубах также возникают вследствие автоколебаний, поддерживаемых воздушной струей. Автоколебательными системами являются двигатели внутреннего сгорания, паровые турбины, ламповый генератор и т. д.

ВОЛНОВОЙ ПРОЦЕСС (ВОЛНА) — процесс распространения колебаний в сплошной среде.

Колебания, возбужденные в какой-либо точке среды (твердой, жидкой или газообразной), распространяются в ней с конечной скоростью, зависящей от свойств среды, передаваясь от

одной точки среды к другой. Чем дальше расположена частица среды от источника колебаний, тем позднее она начнет колебаться. Иначе говоря, фазы колебаний частиц среды и источника тем больше отличаются друг от друга, чем больше расстояние между ними. При изучении распространения колебаний не учитывается дискретное (молекулярное) строение среды и **среда** рассматривается как **сплошная**, т. е. непрерывно распределенная в пространстве и обладающая упругими свойствами.

При распространении волны частицы среды не движутся вместе с волной, а колеблются около своих положений равновесия. Вместе с волной от частицы к частице среды передаются лишь состояние колебательного движения и его энергия. Поэтому *основным свойством всех волн, независимо от их природы, является перенос энергии без переноса вещества.*

ВЫНУЖДЕННЫЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ — *незатухающие* колебания, возникающие под действием внешней периодически изменяющейся силы

$$F = F_0 \cos \omega t,$$

где F_0 — амплитудное значение вынуждающей силы, ω — циклическая частота внешней вынуждающей силы. Амплитуда вынужденных колебаний зависит от амплитудного значения внешней силы, степени затухания в колебательной системе, а также от соотношения между собственной частотой колебательной системы и частотой внешней вынуждающей силы.

Примерами вынужденных колебаний могут служить колебания гребных винтов, валов турбин, мембраны телефона и т. д.

В любой *реальной* колебательной системе совершаются **затухающие колебания** — колебания, амплитуда которых из-за потерь энергии с течением времени уменьшается. Чтобы в реальной колебательной системе получить *незатухающие* колебания, надо потери энергии компенсировать.

ВЫНУЖДЕННЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ — *незатухающие* колебания в колебательном контуре, возникающие под действием внешней периодически изменяющейся ЭДС

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 \cos \omega t,$$

где \mathcal{E}_0 — амплитудное значение вынуждающей ЭДС, ω — циклическая частота внешней ЭДС.

Примерами вынужденных колебаний являются периодические изменения силы тока и напряжения в электрической цепи под действием внешней ЭДС.

ГЕНЕРАТОР ПЕРЕМЕННОГО ТОКА, МОДЕЛЬ. Генератор переменного тока — машина, преобразующая механическую энергию вращения в электрическую энергию переменного тока. *Простейшая модель* генератора переменного тока — проволочная рамка, равномерно вращающаяся ($\omega = \text{const}$) в однородном ($B = \text{const}$) магнитном поле (рис. 103).

Магнитный поток, сцепленный с рамкой площадью S , в любой момент времени t равен:

$$\Phi = BS \cos \alpha = BS \cos \omega t,$$

где $\alpha = \omega t$ — угол поворота рамки в момент времени t (начало отсчета выбрано так, что при $t = 0$ угол поворота $\alpha = 0$).

При вращении рамки в ней будет возникать переменная ЭДС индукции

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt} = BS\omega \sin \omega t. \quad (1)$$

При $\sin \omega t = 1$ ЭДС индукции \mathcal{E}_i максимальна, т. е. амплитуда ЭДС индукции

$$\mathcal{E}_m = BS\omega. \quad (2)$$

Учитывая формулу (1), выражение (2) можно записать в виде

$$\mathcal{E}_i = \mathcal{E}_m \sin \omega t.$$

Таким образом, если в однородном магнитном поле равномерно вращается рамка, то в ней возникает переменная ЭДС, изменяющаяся по гармоническому закону.

Если концы витка (с помощью контактных колец и щеток) соединить с электрической цепью, то в электрической цепи

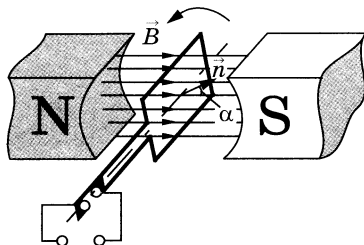


Рис. 103

под действием переменной ЭДС возникнут вынужденные гармонические колебания силы тока — переменный ток. Для получения больших \mathcal{E}_m надо увеличить число и площадь витков.

ЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ — распространяющиеся в среде упругие волны, обладающие частотами в пределах 16—20 000 Гц. Волны указанных частот, действуя на слуховой аппарат человека, вызывают ощущение звука. Волны с частотами $\nu < 16$ Гц (**инфразвуковые**) и $\nu > 20$ кГц (**ультразвуковые**) органами слуха человека не воспринимаются.

Звуковые волны в газах и жидкостях могут быть только продольными, так как эти среды обладают упругостью лишь по отношению к деформациям сжатия (растяжения). В твердых телах звуковые волны могут быть как продольными, так и поперечными, так как упругие свойства твердых тел проявляются при деформациях сжатия (растяжения) и сдвига.

Интенсивность звука (сила звука) — величина, определяемая средней по времени энергией, переносимой звуковой волной в единицу времени сквозь единичную площадку, перпендикулярную направлению распространения волны:

$$I = \frac{W}{St}.$$

Единица интенсивности звука — **ватт на квадратный метр** (Вт/м^2).

Чувствительность человеческого уха различна для разных частот. Для того чтобы вызвать звуковое ощущение, волна должна обладать некоторой минимальной интенсивностью, но если эта интенсивность превышает определенный предел, то звук не слышен и вызывает только болевое ощущение. Таким образом, для каждой частоты колебаний существуют наименьшая (**порог слышимости**) и наибольшая (**порог болевого ощущения**) интенсивности звука, которые способны вызвать звуковое восприятие.

Громкость звука — субъективная характеристика звука, связанная с его интенсивностью (амплитудой колебаний в звуковой волне).

Единица громкости — **бел (Б)**. Обычно пользуются единицами в 10 раз меньшими — *децибелами (дБ)*.

Реальный звук является наложением гармонических колебаний с большим набором частот, т. е. звук обладает **акустическим спектром**, который может быть **сплошным** (в некотором интервале присутствуют колебания всех частот) и **линейчатым** (присутствуют колебания отделенных друг от друга определенных частот).

Звук характеризуется помимо громкости еще высотой и тембром. **Высота звука** — качество звука, определяемое человеком субъективно на слух и зависящее от частоты звука. С ростом частоты высота звука увеличивается, т. е. звук становится выше. Характер акустического спектра и распределения энергии между определенными частотами определяет своеобразие звукового ощущения, называемое **тембром звука**. Так, различные певцы, берущие одну и ту же ноту, имеют различный акустический спектр, т. е. их голоса имеют различный тембр.

Источником звука может быть всякое тело, колеблющееся в упругой среде со звуковой частотой (например, в струнных инструментах источником звука является струна, соединенная с корпусом инструмента).

Скорость распространения звуковых волн связана с длиной волны λ и частотой колебаний ν формулой:

$$v = \lambda \nu.$$

Для акустики помещений большое значение имеет **реверберация звука** — процесс постепенного затухания звука в закрытых помещениях после выключения его источника. Если помещения пустые, то происходит медленное затухание звука и создается гулкость помещения. Если звуки затухают быстро (при применении звукопоглощающих материалов), то они воспринимаются приглушенными. **Время реверберации** — это время, в течение которого интенсивность звука в помещении ослабляется в миллион раз, а его уровень — на 60 дБ. Помещение обладает хорошей акустикой, если время реверберации составляет 0,5—1,5 с.

КОЛЕБАНИЯ — это движения или процессы, которые характеризуются определенной повторяемостью во времени. колеба-

тельные процессы широко распространены в природе и технике, например качание маятника часов, переменный электрический ток и т. д. При колебательном движении маятника изменяется координата его центра масс, в случае переменного тока колеблются напряжение и ток в цепи. Физическая природа колебаний может быть разной, поэтому различают колебания механические, электромагнитные и др. Однако различные колебательные процессы описываются одинаковыми характеристиками и аналогичными уравнениями. Следовательно, к изучению колебаний *различной физической природы* целесообразно применять *единый подход*.

Колебания называются **свободными** (или **собственными**), если они совершаются за счет первоначально сообщенной энергии при последующем отсутствии внешних воздействий на колебательную систему (систему, совершающую колебания). Пример свободных колебаний — математический маятник, пружинный маятник, колебательный контур.

Простейшим типом колебаний являются **гармонические колебания** — колебания, при которых колеблющаяся величина изменяется со временем по закону синуса (косинуса). Гармонические колебания важно рассматривать по двум причинам: 1) колебания, встречающиеся в природе и технике, часто имеют характер, близкий к гармоническому; 2) различные **периодические процессы** (процессы, повторяющиеся через равные промежутки времени) можно представить как наложение гармонических колебаний.

КОЛЕБАТЕЛЬНЫЙ КОНТУР — цепь, состоящая из включенных последовательно катушки индуктивностью L , конденсатора емкостью C и резистора сопротивлением R . Колебательный контур предназначен для возбуждения и поддержания **электромагнитных колебаний**, сопровождающихся периодическим изменением электрических величин (зарядов, токов) и взаимными преращениями электрического и магнитного полей.

Рассмотрим идеализированный колебательный контур, в котором $R \approx 0$. Для возбуждения в контуре колебаний конденсатор предварительно заряжают, сообщая его обкладкам заря-

ды $\pm Q$. В начальный момент времени $t = 0$ между обкладками конденсатора возникнет электрическое поле, энергия которого $\frac{Q^2}{2C}$. Если замкнуть конденсатор на катушку индуктивности, он начнет разряжаться, и в контуре потечет возрастающий со временем ток I . В результате энергия электрического поля будет уменьшаться, а энергия магнитного поля катушки (она равна $\frac{1}{2}LI^2$) — возрастать.

Согласно закону сохранения энергии полная энергия контура

$$W = \frac{1Q^2}{2C} + \frac{1LI^2}{2} = \text{const},$$

так как при $R \approx 0$ энергия не расходуется на нагревание. Поэтому в момент времени $t = \frac{1}{4}T$, когда конденсатор полностью разрядится, энергия электрического поля обращается в нуль, а энергия магнитного поля (а следовательно, и ток) достигает наибольшего значения. Начиная с этого момента ток в контуре будет убывать; в результате начнет ослабевать магнитное поле катушки, и в ней будет индуцироваться ток, который течет (согласно правилу Ленца) в том же направлении, что и ток разрядки конденсатора. Конденсатор начнет перезаряжаться, возникнет электрическое поле, стремящееся ослабить ток, который в конце концов обратится в нуль, а заряд на обкладках конденсатора достигнет максимума. Далее те же процессы начнут протекать в обратном направлении, и система к моменту времени $t = T$ придет в первоначальное состояние. После этого весь рассмотренный цикл повторится сначала.

Если бы потерь энергии не было, то в контуре совершались бы периодические незатухающие колебания, т. е. периодически изменялись (колебались) бы заряд Q на обкладках конденсатора, напряжение U на конденсаторе и сила тока I , текущего через катушку индуктивности. Следовательно, в контуре возникают электрические колебания, причем эти колебания сопровождаются превращениями энергий электрического и магнитного полей.

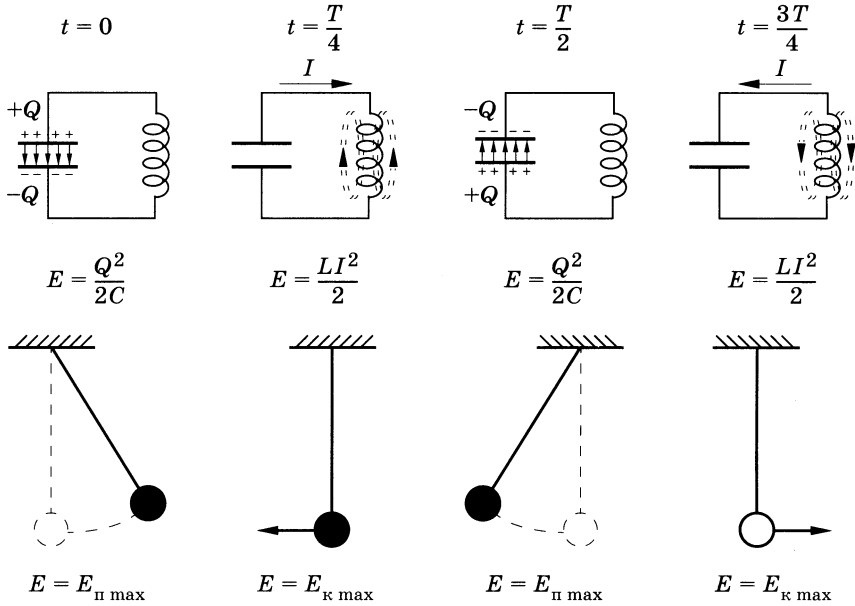


Рис. 104

Электрические колебания в колебательном контуре можно сопоставить с механическими колебаниями маятника (рис. 104), сопровождающимися взаимными превращениями его потенциальной и кинетической энергий. В данном случае энергия электрического поля конденсатора $Q^2/(2C)$ аналогична потенциальной энергии маятника $E_{\text{п}}$, энергия магнитного поля катушки $LI^2/2$ — кинетической энергии маятника $E_{\text{к}}$, сила тока I в контуре — скорости движения маятника v . Индуктивность L играет роль массы m , а сопротивление контура — роль силы трения, действующей на маятник.

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ МАЯТНИК — это *идеализированная* система, состоящая из материальной точки, подвешенной на нерастяжимой невесомой нити, и колеблющаяся под действием силы тяжести. Хорошим приближением математического маятника является небольшой тяжелый шарик массой m , подвешенный на тонкой длинной нити.

В положении равновесия математического маятника сила тяжести $m\vec{g}$ уравнивается силой натяжения нити \vec{T} (рис. 105, а). При отклонении маятника из положения равновесия возникает возвращающая сила $\vec{F} = m\vec{g} + \vec{T}$. Из рис. 105, б следует, что $F = mg \sin \alpha$, причем при *малых углах отклонения* $\sin \alpha \approx \alpha = x/l$. Поскольку направления смещения и возвращающей силы противоположны, то

$$F = -\frac{mg}{l}x,$$

где x — абсолютное смещение маятника из положения равновесия, l — длина нити.

Из этой формулы следует, что ускорение маятника

$$a = -\frac{g}{l}x = -\omega_0^2 x,$$

где

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}},$$

т. е. малые колебания математического маятника — свободные гармонические колебания с собственной циклической частотой ω_0 и периодом

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}.$$

Период малых колебаний математического маятника *не зависит от массы маятника и амплитуды его колебаний*.

Кинетическая и потенциальная энергия математического маятника:

$$E_k = \frac{mv^2}{2}, \quad E_{II} = mgh.$$

МЕХАНИЧЕСКИЕ ГАРМОНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ. Уравнения гармонических колебаний:

$$x = A \cos(\omega_0 t + \varphi) \text{ и } x = A \sin(\omega_0 t + \varphi)^1,$$

¹ В пособии используется функция косинуса.

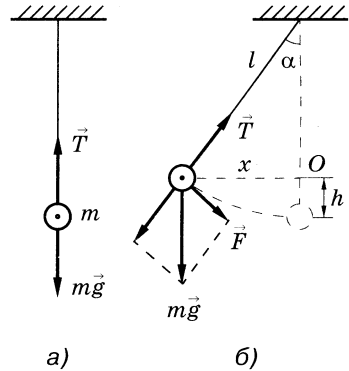


Рис. 105

где x — смещение колеблющейся точки от положения равновесия в момент времени t , A — максимальное значение колеблющейся величины, называемое **амплитудой колебаний**, ω_0 — **круговая (циклическая) частота**, φ — **начальная фаза колебания** в момент времени $t = 0$, $(\omega_0 t + \varphi)$ — **фаза колебания** в момент времени t . Фаза колебания определяет значение колеблющейся величины в данный момент времени. Так как косинус изменяется в пределах от $+1$ до -1 , то x может принимать значения от $+A$ до $-A$.

Период гармонического колебания — промежуток времени T , в течение которого фаза колебания получает приращение 2π , т. е.

$$\omega_0(t + T) + \varphi = (\omega_0 t + \varphi) + 2\pi,$$

откуда

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0}.$$

Величина, обратная периоду колебаний,

$$\nu = \frac{1}{T},$$

т. е. число полных колебаний, совершаемых в единицу времени, называется **частотой колебаний**. Сравнивая две последние формулы, получим

$$\omega_0 = 2\pi\nu.$$

Единица частоты — **герц (Гц)**: 1 Гц — частота периодического процесса, при которой за 1 с совершается один цикл процесса.

МОЩНОСТЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Мгновенное значение мощности переменного тока равно произведению мгновенных значений напряжения и силы тока:

$$P(t) = U(t)I(t).$$

Если цепь переменного тока состоит из последовательно включенных резистора, катушки индуктивности и конденсатора и напряжение в ней из-

меняется по закону $U(t) = U_m \cos \omega t$, то в цепи течет ток $I(t) = I_m \cos (\omega t - \varphi)$. Тогда

$$\begin{aligned} P(t) &= I_m U_m \cos (\omega t - \varphi) \cos \omega t = \\ &= I_m U_m (\cos^2 \omega t \cos \varphi + \sin \omega t \cos \omega t \sin \varphi). \end{aligned}$$

Практический интерес представляет не мгновенное значение мощности, а ее среднее значение за период колебания.

Учитывая, что $\langle \cos^2 \omega t \rangle = \frac{1}{2}$, $\langle \sin \omega t \cos \omega t \rangle = 0$, получим

$$\langle P \rangle = \frac{1}{2} I_m U_m \cos \varphi.$$

Из векторной диаграммы (см. рис. 115, б) $\cos \varphi = RI_m / U_m$, поэтому

$$\langle P \rangle = \frac{1}{2} RI_m^2. \quad (1)$$

Такую же мощность развивает постоянный ток $I = I_m / \sqrt{2}$.

Величины

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}, \quad U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$$

называются соответственно **действующими значениями силы тока и напряжения**. Все *амперметры и вольтметры градуируются по действующим значениям силы тока и напряжений*.

Учитывая действующие значения тока и напряжения, выражение для средней мощности (1) можно записать в виде:

$$\langle P \rangle = IU \cos \varphi, \quad (2)$$

где множитель $\cos \varphi$ называется **коэффициентом мощности**.

Формула (2) показывает, что мощность, выделяемая в цепи переменного тока, в общем случае зависит не только от силы тока и напряжения, но и от сдвига фаз между ними. Если в цепи реактивное сопротивление отсутствует, то $\cos \varphi = 1$ и $P = IU$. Если цепь содержит только реактивное сопротивление ($R = 0$), то $\cos \varphi = 0$ и средняя мощность равна нулю, какими бы большими ни были ток и напряжение. Если $\cos \varphi$ имеет значения, существенно меньшие единицы, то для передачи задан-

ной мощности при данном напряжении генератора нужно увеличивать силу тока I , что приведет либо к выделению джоулевой теплоты, либо потребует увеличения сечения проводов, что повышает стоимость линий электропередачи. Поэтому на практике всегда стремятся увеличить $\cos \varphi$, наименьшее допустимое значение которого для промышленных установок составляет примерно 0,85.

ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК — любой ток, изменяющийся во времени. В технике обычно под переменным током понимают ток с частотой 50 Гц, изменяющийся по гармоническому закону. Установившиеся вынужденные электромагнитные колебания можно рассматривать как протекание переменного тока в цепи, содержащей резистор, катушку индуктивности и конденсатор. Обычно в цепях переменного тока подается переменное напряжение

$$U = U_m \cos \omega t,$$

где U_m — амплитудное значение напряжения, $\omega = 2\pi\nu$ — циклическая частота ($\nu = 50$ Гц).

ПЛОСКИЕ И СФЕРИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ. Волна, распространяясь от источника колебаний, охватывает все новые и новые области пространства. Геометрическое место точек, до которых доходят колебания к моменту времени t , называется **волновым фронтом**. Геометрическое место точек, колеблющихся в одинаковой фазе, называется **волновой поверхностью**. Волновых поверхностей можно провести бесчисленное множество, а волновой фронт в каждый момент времени — один, причем фронт волны перемещается со временем, а волновая поверхность нет. *Волновой фронт является одной из волновых поверхностей.*

Линия, касательная к которой в каждой точке совпадает с направлением распространения волны, называется **лучом**. В **изотропной среде** (ее свойства по всем направлениям одинаковы) луч — прямая, *перпендикулярная волновой поверхности* и совпадающая с направлением переноса энергии волной.

Различают **плоские** и **сферические волны**. Для **плоских волн** волновые поверхности — совокупность параллельных плоскостей, перпендикулярных направлению распро-

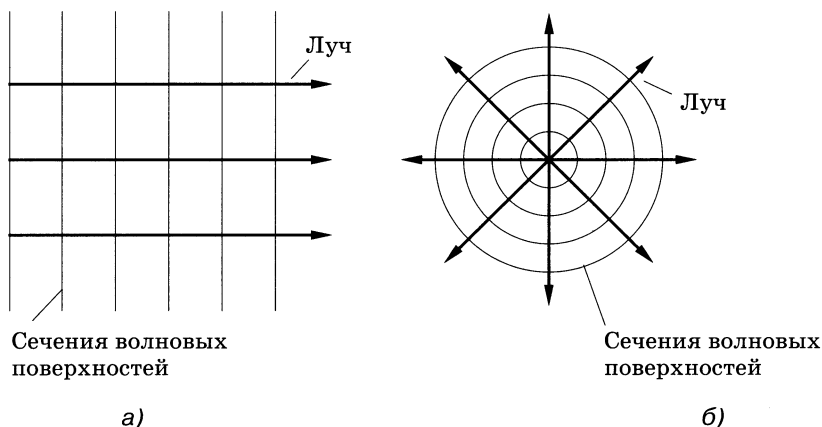


Рис. 106

странения волны. Лучи в данном случае — параллельные прямые, совпадающие с направлением скорости распространения волны (рис. 106, а).

У **сферических волн** волновые поверхности — совокупность концентрических сфер. Лучи в данном случае направлены вдоль радиусов сфер от центра, где расположен источник волны (рис. 106, б).

ПЛОТНОСТЬ ПОТОКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ — физическая величина, определяемая энергией, переносимой электромагнитными волнами через перпендикулярную излучению единицу площади поверхности за единицу времени

$$I = \frac{\Delta W}{S \Delta t}. \quad (1)$$

Эта величина называется иногда **интенсивностью волны**.

Единица плотности потока электромагнитного излучения — **ватт на квадратный метр** ($\text{Вт}/\text{м}^2$): $1 \text{ Вт}/\text{м}^2$ равен плотности потока электромагнитного излучения, при которой через перпендикулярную излучению поверхность площадью 1 м^2 переносится поток излучения 1 Вт .

Выделим в вакууме, где распространяется плоская электромагнитная волна, участок поверхности площадью S , перпен-

дикулярный излучению. За время Δt через эту поверхность переносится энергия, содержащаяся в объеме $\Delta V = Sc \Delta t$, т. е. энергия $\Delta W = w \Delta V = wSc \Delta t$ (w — объемная плотность энергии). Подставив последнее выражение в формулу (1), получим

$$I = wc,$$

т. е. плотность потока излучения равна произведению объемной плотности электромагнитной энергии на скорость ее распространения.

ПОЛУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН. Источником электромагнитных волн может быть *любой электрический колебательный контур или проводник, по которому течет переменный электрический ток*, так как для возбуждения электромагнитных волн необходимо создать в пространстве переменное электрическое поле или соответственно переменное магнитное поле.

Излучающая способность источника определяется *его формой, размерами и частотой колебаний*. Чтобы излучение играло заметную роль, необходимо увеличить объем пространства, в котором переменное электромагнитное поле создается. Поэтому для получения электромагнитных волн непригодны закрытые колебательные контуры, так как в них электрическое поле сосредоточено между обкладками конденсатора, а магнитное — внутри катушки индуктивности.

Простейшим источником электромагнитных волн служит **открытый колебательный контур (вibrator Герца)**, где увеличен объем пространства, в котором создается переменное электромагнитное поле, распространяющееся в среде, окружающей вибратор.

В дальнейшем использовали **массовый излучатель**, в котором короткие электромагнитные волны возбуждались колебаниями электрических зарядов в атомах и молекулах. *Ламповые генераторы* позволяют получать колебания практически любой мощности.

ПРИНЦИП СУПЕРПОЗИЦИИ (НАЛОЖЕНИЯ) ВОЛН: при распространении в линейной среде нескольких волн каждая из них

распространяется так, как будто другие волны отсутствуют, а результирующее смещение частицы среды в любой момент времени равно геометрической сумме смещений, которые получают частицы, участвуя в каждом из слагающих волновых процессов.

Линейная среда — среда, в которой одновременно распространяется несколько волн и ее свойства не изменяются под действием возмущений, создаваемых волнами.

ПРУЖИННЫЙ МАЯТНИК — система, состоящая из груза, подвешенного на абсолютно упругой пружине и совершающего гармонические колебания под действием упругой силы.

Если вывести маятник из положения равновесия, сместив его вниз вдоль оси X , то маятник начнет совершать колебания около положения равновесия O , двигаясь поступательно (рис. 107). Сила упругости направлена в сторону, противоположную смещению, и, согласно закону Гука, равна:

$$F = -kx,$$

где k — жесткость пружины, x — абсолютное смещение маятника.

По второму закону Ньютона

$$F = ma,$$

где m — масса груза.

Тогда ускорение маятника

$$a = -\frac{k}{m}x = -\omega_0^2 x,$$

где

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}},$$

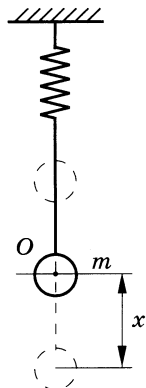


Рис. 107

т. е. пружинный маятник совершает свободные гармонические колебания с собственной циклической частотой ω_0 и периодом

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

(эта формула справедлива для упругих колебаний в пределах, для которых выполняется *закон Гука*, т. е. когда масса пружины мала по сравнению с массой тела).

Кинетическая и потенциальная энергия пружинного маятника (см. Скорость, ускорение, энергия гармонического колебательного движения) определяются по формулам:

$$E_{\text{к}} = \frac{mv^2}{2} = \frac{m\omega_0^2 A^2}{2} \sin^2(\omega_0 t + \varphi),$$

$$E_{\text{п}} = \frac{kx^2}{2} = \frac{kA^2}{2} \cos^2(\omega_0 t + \varphi),$$

а полная энергия

$$E = E_{\text{к}} + E_{\text{п}} = \frac{kA^2}{2}.$$

Упругая сила консервативна, а потому превращения энергии при гармонических колебаниях пружинного маятника происходят в соответствии с *законом сохранения механической энергии*. Полная энергия пружинного маятника постоянна и равна максимальной кинетической (в положении равновесия) или максимальной потенциальной (в крайних точках) энергии:

$$\frac{mv_{\text{max}}^2}{2} = \frac{kA^2}{2},$$

откуда

$$\frac{A}{v_{\text{max}}} = \sqrt{\frac{m}{k}}.$$

РЕЗОНАНС В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА — резкое возрастание амплитуды вынужденных колебаний силы тока при совпадении циклической частоты ω внешнего переменного напряжения с собственной частотой ω_0 колебательного контура.

Полное сопротивление цепи переменного тока при последовательном соединении элементов цепи наи-

меньшее (а именно тогда амплитуда силы тока достигает наибольшего возможного при данном U_m значения) при условии

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}. \quad (1)$$

В данном случае колебания силы тока и напряжения совпадают по фазе (происходят синфазно) (см. формулу (1) в разделе «Цепь переменного тока с последовательно включенным и резистором, катушкой индуктивности и конденсатором»).

Условию (1) удовлетворяет частота

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega_0, \quad (2)$$

которая совпадает с циклической частотой ω_0 свободных незатухающих электромагнитных колебаний в колебательном контуре.

Частота, определяемая формулой (2), — **резонансная циклическая частота** (она не зависит от активного сопротивления).

Амплитуда установившихся колебаний силы тока при резонансе в цепи переменного тока

$$I_m = \frac{U_m}{R}.$$

Резонанс отчетливо проявляется лишь при малом активном сопротивлении контура. На рис. 108 приведены резонансные кривые (зависимость I_m от ω) при различных сопротивлениях.

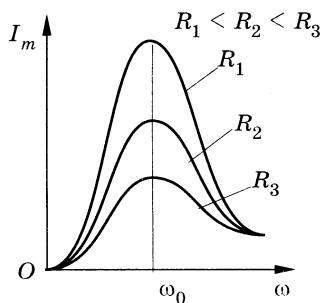


Рис. 108

РЕЗОНАНС МЕХАНИЧЕСКИЙ — резкое возрастание амплитуды вынужденных колебаний при совпадении (приближении) частоты внешней вынуждающей силы с частотой сво-

бодных незатухающих колебаний колебательной системы. При механических колебаниях резонанс отчетливо выражен при малых значениях в колебательной системе.

Явления резонанса могут быть как вредными, так и полезными. Например, при конструировании машин и различного рода сооружений необходимо, чтобы их собственная частота колебаний не совпадала с частотой возможных внешних воздействий, в противном случае возникнут вибрации, которые могут вызвать серьезные разрушения. С другой стороны, резонанс широко используется, например, в акустике для усиления звука.

РЕЗОНАНС ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ — резкое возрастание амплитуды в вынужденных колебаниях при совпадении (приближении) частоты вынуждающего переменного напряжения с собственной частотой колебательного контура. В колебательном контуре резонанс отчетливо выражен при малом активном сопротивлении R . В радиотехнике используется, например, для настройки на нужную радиостанцию на фоне других.

СВОБОДНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ. Пусть в колебательном контуре отсутствуют внешние ЭДС, тогда колебания будут **свободными**. Если сопротивление $R = 0$, то свободные электромагнитные колебания в контуре являются **гармоническими**.

При этих условиях, согласно второму правилу Кирхгофа,

$$U_C = \mathcal{E}_s,$$

где $U_C = \frac{Q}{C}$ — напряжение на конденсаторе, $\mathcal{E}_s = -L \frac{dI}{dt}$ — ЭДС самоиндукции, возникающая в контуре.

Следовательно,

$$L \frac{dI}{dt} + \frac{Q}{C} = 0.$$

Разделив все члены уравнения на L и подставив $I = \frac{dQ}{dt} = Q'$ и $\frac{dI}{dt} = Q''$, получим *уравнение свободных гармонических колебаний заряда в колебательном контуре*:

$$Q'' = -\frac{1}{LC} Q \quad (1)$$

или

$$Q'' = -\omega_0^2 Q$$

(аналогично формуле $a = -\omega_0^2 x$ или $x'' = -\omega_0^2 x$, см. П р у ж и н н ы й и м а т е м а т и ч е с к и й м а я т н и к и), где

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \text{ — собственная частота контура.}$$

Период свободных гармонических колебаний в контуре

$$T = 2\pi/\omega_0 \text{ или } T = 2\pi\sqrt{LC}. \quad (2)$$

Формула (2) называется **формулой Томсона**.

Заряд Q совершает гармонические колебания в контуре по закону

$$Q = Q_m \cos \omega_0 t,$$

в чем можно убедиться, подставив последнее выражение в уравнение (1).

Сила тока в колебательном контуре

$$\begin{aligned} I = \frac{dQ}{dt} = Q' &= -\omega_0 Q_m \sin \omega_0 t = \\ &= I_m \cos \omega_0 t, \end{aligned}$$

где $I_m = \omega_0 Q_m$ — амплитуда силы тока.

Колебания тока I опережают по фазе колебания заряда Q на $\pi/2$ (рис. 109), т. е. когда ток достигает максимального значения, заряд (а также и напряжение на конденсаторе $U = Q/C$) обращается в нуль, и наоборот.

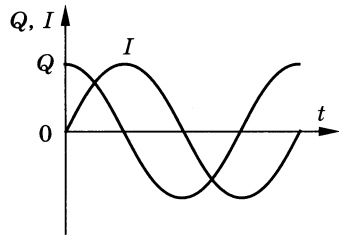


Рис. 109

СКОРОСТЬ, УСКОРЕНИЕ, ЭНЕРГИЯ ГАРМОНИЧЕСКОГО КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

Скорость гармонического колебания, описываемого уравнением

$$x = A \cos (\omega_0 t + \varphi), \tag{1}$$

равна первой производной координаты по времени:

$$v = \frac{dx}{dt} = -A\omega_0 \sin (\omega_0 t + \varphi) = A\omega_0 \cos \left(\omega_0 t + \varphi + \frac{\pi}{2} \right).$$

Ускорение гармонического колебания равно первой производной скорости по времени:

$$a = \frac{dv}{dt} = -A\omega_0^2 \cos (\omega_0 t + \varphi) = A\omega_0^2 \cos (\omega_0 t + \varphi + \pi). \tag{2}$$

Амплитуды скорости и ускорения соответственно равны $A\omega_0$ и $A\omega_0^2$. Фаза скорости отличается от фазы смещения на $\pi/2$, а фаза ускорения — на π . В моменты времени, когда $x = 0$, v приобретает наибольшие значения; когда же x достигает максимального отрицательного значения, то a приобретает наибольшее положительное значение (рис. 110, а).

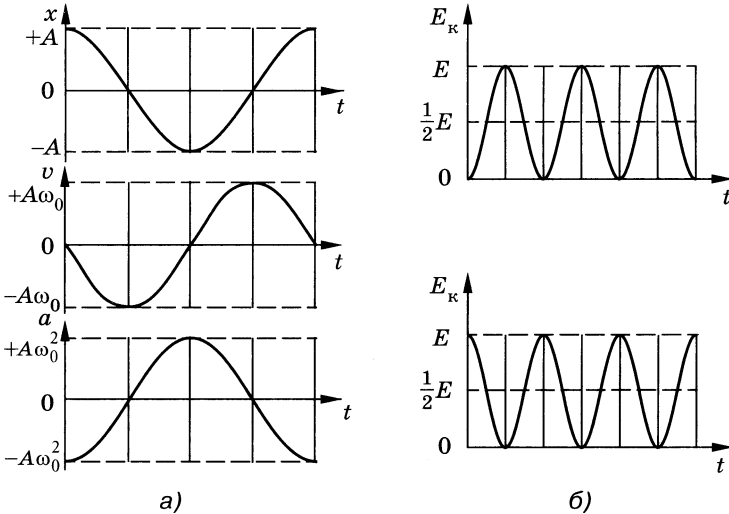


Рис. 110

Сила $F = ma$, действующая на колеблющуюся материальную точку массой m , с учетом формул (1) и (2) равна:

$$F = -m\omega_0^2 x.$$

Кинетическая энергия материальной точки, совершающей прямолинейные гармонические колебания, записывается в виде:

$$E_{\text{к}} = \frac{mv^2}{2} = \frac{mA^2\omega_0^2}{2} \sin^2(\omega_0 t + \varphi) = \frac{mA^2\omega_0^2}{4} [1 - \cos 2(\omega_0 t + \varphi)].$$

Потенциальная энергия материальной точки, совершающей гармонические колебания под действием упругой силы F , равна:

$$\begin{aligned} E_{\text{п}} &= \frac{kx^2}{2} = \frac{m\omega_0^2 x^2}{2} = \frac{mA^2\omega_0^2}{2} \cos^2(\omega_0 t + \varphi) = \\ &= \frac{mA^2\omega_0^2}{4} [1 + \cos 2(\omega_0 t + \varphi)], \end{aligned}$$

таким образом, $E_{\text{к}}$ и $E_{\text{п}}$ изменяются с частотой $2\omega_0$ (рис. 110, б), т. е. с частотой, которая в два раза превышает частоту гармонического колебания.

Полная энергия гармонического колебания

$$E = E_{\text{к}} + E_{\text{п}} = \frac{mA^2\omega_0^2}{2}.$$

Полная энергия остается постоянной, так как упругая сила консервативна и в данном случае выполняется закон сохранения механической энергии. Для каждого момента времени сложение ординат графиков кинетической и потенциальной энергий (см. рис. 110, б) дает амплитудное значение той или иной энергии, т. е. согласно закону сохранения механической энергии потенциальная энергия превращается в кинетическую и наоборот.

ТРАНСФОРМАТОРЫ — устройства, используемые для понижения или повышения напряжения переменного тока. Их работа основана на явлении электромагнитной индукции. Принципиальная схема трансформатора показана на рис. 111. Первичная и вторичная катушки (обмотки),

имеющие соответственно N_1 и N_2 витков, укреплены на замкнутом железном сердечнике. Так как концы первичной обмотки присоединены к источнику переменного напряжения U_1 , то в ней возникает переменный ток I_1 , создающий в сердечнике трансформатора переменный магнитный поток Φ , который возбуждает ЭДС индукции в каждой обмотке (магнитный поток локализован внутри сердечника и одинаков во всех его сечениях).

В любой момент времени

$$\mathcal{E}_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} \text{ и } \mathcal{E}_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt},$$

откуда

$$\frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{N_1}{N_2}.$$

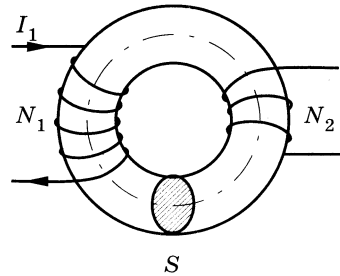


Рис. 111

Отношение числа витков N_2/N_1 , показывающее, во сколько раз ЭДС во вторичной обмотке трансформатора больше (или меньше), чем в первичной, называется **коэффициентом трансформации**.

Пренебрегая потерями энергии (в современных трансформаторах они не превышают 2% и связаны в основном с выделением в обмотках джоулевой теплоты и появлением вихревых токов) и применяя закон сохранения энергии, можем записать, что мощности тока в обеих обмотках трансформатора практически одинаковы:

$$P_1 \approx P_2.$$

Поскольку $P_1 = I_1 U_1$ и $P_2 = I_2 U_2$, то

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1},$$

т. е. повышая с помощью трансформатора в несколько раз напряжение, во столько же раз уменьшаем силу тока.

Если $N_2/N_1 > 1$, то трансформатор называется **повышающим**. Он увеличивает напряжение и понижает ток (применяется, например, для передачи электроэнергии на большие

расстояния, так как в данном случае потери на джоулеву теплоту, пропорциональные квадрату силы тока, снижаются); если $N_2/N_1 < 1$, трансформатор называется **понижающим**. Он уменьшает напряжение и повышает ток (применяется, например, при электросварке, так как для нее требуется большой ток при низком напряжении).

УПРУГИЕ ВОЛНЫ — механические возмущения (деформации), распространяющиеся в упругой среде (среда, между частицами которой действуют силы взаимодействия, препятствующие деформации этой среды).

Упругие волны бывают *продольные* и *поперечные*. В **продольных волнах** частицы среды колеблются в направлении распространения волны, в **поперечных** — в плоскостях, перпендикулярных направлению распространения волны. Продольные волны могут возбуждаться в средах, в которых возникают упругие силы *при деформации сжатия и растяжения*, т. е. в твердых, жидких и газообразных телах. Поперечные волны существуют в среде, в которой возникают упругие силы *при деформации сдвига*, т. е. в твердых телах; *в жидкостях и газах распространяются только продольные волны, а в твердых телах — как продольные, так и поперечные*.

Упругая волна называется **гармонической**, если соответствующие ей колебания частиц среды являются гармоническими. На рис. 112 представлена гармоническая поперечная волна, распространяющаяся со скоростью v вдоль оси X , т. е. приведена зависимость между смещением y частиц среды, участвующих в волновом процессе, и расстоянием x этих частиц (например, частицы B) от источника колебаний O для какого-то фиксированного момента времени t . Приведенный график по виду похож на график гармонического колебания, однако они отличаются *по существу*. **График волны** дает зависимость смещения *всех*

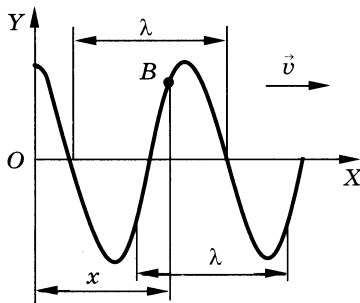


Рис. 112

частиц среды от источника колебаний в данный момент времени, а график колебаний — зависимость смещения данной частицы от времени.

Расстояние между ближайшими частицами, колеблющимися в одинаковой фазе, называется **длиной волны** λ (см. рис. 112). Длина волны равна расстоянию, на которое распространяется определенная фаза колебания за период, т. е.

$$\lambda = vT,$$

или, учитывая, что $T = 1/\nu$, где ν — частота колебаний,

$$v = \lambda\nu.$$

Скорость распространения волны (фазовая скорость) — физическая величина, определяемая расстоянием, проходимым за единицу времени любой точкой *волновой поверхности*.

ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С КАТУШКОЙ ИНДУКТИВНОСТИ. При изменениях силы тока по гармоническому закону

$$I = I_m \cos \omega t, \quad (1)$$

в катушке L (рис. 113, а) возникает ЭДС самоиндукции и

$$\mathcal{E}_s = -L \frac{dI}{dt} = \omega LI_m \sin \omega t,$$

где L — индуктивность катушки. Поскольку активное сопротивление катушки равно нулю, то в каждый момент времени ЭДС самоиндукции равна по модулю и противоположна по знаку напряжению на концах катушки:

$$\begin{aligned} U_L &= -\mathcal{E}_s = -\omega LI_m \sin \omega t = \\ &= \omega LI_m \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) = \\ &= U_{Lm} \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right), \end{aligned} \quad (2)$$

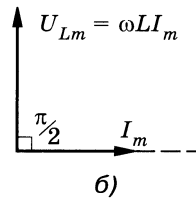
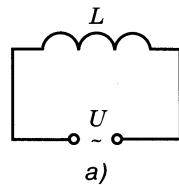


Рис. 113

где $\omega LI_m = U_{Lm}$ — амплитуда колебаний напряжения на катушке. Из формул (1) и (2) следует, что колебания напряжения на концах катушки опережают по фазе колебания силы тока на $\pi/2$, что и показано на векторной диаграмме (рис. 113, б).

Амплитуда колебаний силы тока

$$I_m = \frac{U_{Lm}}{\omega L} = \frac{U_{Lm}}{X_L},$$

где $X_L = \omega L$ — **индуктивное сопротивление** (реактивное индуктивное сопротивление).

ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С КОНДЕНСАТОРОМ. Поскольку все внешнее напряжение приложено к конденсатору C (рис. 114, а), а сопротивлением подводящих проводов можно пренебречь, то

$$U_C = U_m \cos \omega t.$$

Тогда заряд на обкладках конденсатора изменяется по закону

$$Q = CU_C = CU_m \cos \omega t.$$

Сила тока

$$\begin{aligned} I &= \frac{dQ}{dt} = -\omega CU_m \sin \omega t = \\ &= I_m \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right), \end{aligned} \quad (1)$$

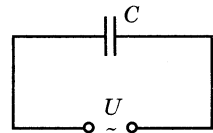
где амплитуда колебаний силы тока

$$I_m = \omega CU_m = \frac{U_m}{1/(\omega C)} = \frac{U_m}{X_C}.$$

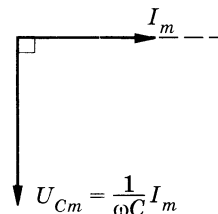
Величина $X_C = \frac{1}{\omega C}$ — **емкостное сопротивление** (реактивное емкостное сопротивление).

Напряжение на обкладках конденсатора

$$U_C = \frac{1}{\omega C} I_m \cos \omega t. \quad (2)$$



а)



б)

Рис. 114

Сравнивая выражения (1) и (2), можно увидеть, что колебания напряжения на обкладках конденсатора отстают по фазе от колебаний силы тока на $\pi/2$, что и показано на векторной диаграмме (рис. 114, б).

ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО ВКЛЮЧЕННЫМИ РЕЗИСТОРОМ, КАТУШКОЙ ИНДУКТИВНОСТИ И КОНДЕНСАТОРОМ.

На рис. 115, а представлен участок цепи, содержащий резистор сопротивлением R , катушку индуктивностью L и конденсатор емкостью C , к концам которого приложено переменное напряжение

$$U = U_m \cos \omega t.$$

В каждый момент времени сумма мгновенных значений напряжений на последовательно включенных элементах цепи равна мгновенному значению приложенного напряжения:

$$U = U_R + U_L + U_C.$$

На рис. 115, б представлена векторная диаграмма амплитуд напряжений на резисторе (U_{Rm}), катушке (U_{Lm}) и конденсаторе (U_{Cm}). Амплитуда колебаний напряжения равна, согласно векторной диаграмме, векторной сумме амплитуд напряжений на отдельных элементах цепи. Из рис. 115, б следует, что угол φ определяет разность фаз между напряжением и силой тока, причем

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}. \quad (1)$$

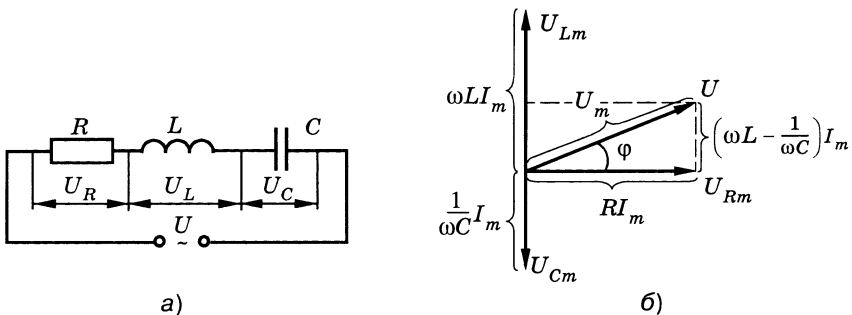


Рис. 115

Из прямоугольного треугольника получаем

$$(RI_m)^2 + \left[\left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) I_m \right]^2 = U_m^2,$$

откуда амплитуда колебаний силы тока имеет значение

$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + \left[\omega L - \frac{1}{\omega C} \right]^2}}. \quad (2)$$

Следовательно, если напряжение в цепи изменяется по закону $U = U_m \cos \omega t$, то в цепи течет ток

$$I = I_m \cos (\omega t - \varphi),$$

где φ и I_m определяются соответственно формулами (1) и (2).

Величина

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (3)$$

называется **полным сопротивлением** цепи переменного тока, а величина

$$X = X_L - X_C = \omega L - \frac{1}{\omega C} \text{ — реактивным сопротивлением.}$$

Формулу (2) с учетом полного сопротивления (3) можно записать в виде:

$$I_m = \frac{U_m}{Z}.$$

Это — **закон Ома для цепи переменного тока**.

ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С РЕЗИСТОРОМ.

Если напряжение, приложенное к концам участка цепи

$$U = U_m \cos \omega t,$$

то через резистор сопротивлением R (рис. 116, а) протекает ток

$$I = \frac{U}{R} = \frac{U_m}{R} \cos \omega t = I_m \cos \omega t,$$

где амплитуда силы тока $I_m = U_m/R$.

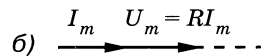
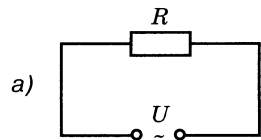


Рис. 116

Фазовые соотношения между током и напряжением наглядны при использовании **векторных диаграмм**: вдоль произвольного направления, называемого осью токов, отложим вектор, модуль которого равен I_m (рис. 116, б). Поскольку в цепи с активным сопротивлением *колебания силы тока и напряжения совпадают по фазе*, то вектор, модуль которого равен U_m , направлен вдоль I_m (сдвиг фаз между I_m и U_m равен нулю).

ШКАЛА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ — непрерывная последовательность длин волн и частот электромагнитных излучений. Электромагнитные излучения, обладая широким диапазоном длин волн (частот), отличаются *по способам их генерации и регистрации*, а также по своим свойствам. В таблице представлены различные виды электромагнитных излучений, хотя отметим, что границы между ними условны.

Вид излучения	Длина волны, м	Частота волны, Гц	Источник излучения
Радиоволны	$10^3—10^4$	$3 \cdot 10^5—$ $3 \cdot 10^{12}$	Колебательный контур Вибратор Герца Массовый излучатель Ламповый генератор
Световые волны: инфракрасное излучение	$5 \cdot 10^4—8 \cdot 10^7$	$6 \cdot 10^{11}—$ $3,75 \cdot 10^{14}$	Лампы Лазеры
видимый свет	$8 \cdot 10^{-7}—4 \cdot 10^{-7}$	$3,75 \cdot 10^{14}—$ $7,5 \cdot 10^{14}$	Лампы Лазеры
ультрафиолетовое излучение	$4 \cdot 10^{-7}—10^{-9}$	$7,5 \cdot 10^{14}—$ $3 \cdot 10^{17}$	Кварцевая лампа Лазеры
рентгеновское излучение	$2 \cdot 10^{-9}—6 \cdot 10^{-12}$	$1,5 \cdot 10^{17}—$ $5 \cdot 10^{19}$	Трубка Рентгена
γ -излучение	$< 6 \cdot 10^{-12}$	$> 5 \cdot 10^{19}$	Радиоактивный распад Ядерные процессы Космические процессы

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ — переменное электромагнитное поле, распространяющееся в пространстве с конечной скоростью, зависящей от свойств среды. Согласно теории Максвелла (1865) электромагнитные волны возникают ввиду того, что переменное электрическое поле порождает переменное магнитное поле, которое, в свою очередь, порождает переменное электрическое поле.

Электромагнитные волны поперечны: колебания векторов напряженности \vec{E} переменного электрического поля и индукции \vec{B} переменного магнитного поля взаимно перпендикулярны (на рис. 117 приведена моментальная «фотография» плоской электромагнитной волны) и лежат в плоскостях, перпендикулярных вектору скорости распространения волны \vec{v} . Векторы \vec{E} , \vec{B} и \vec{v} образуют *правовинтовую систему*: направление распространения электромагнитной волны совпадает с поступательным движением острия винта, головка которого вращается по направлению кратчайшего поворота от вектора \vec{E} к вектору \vec{B} .

Из рис. 117 следует, что взаимно перпендикулярные векторы \vec{E} и \vec{B} в электромагнитной волне колеблются *в одинаковых фазах* — они одновременно достигают максимума и одновременно обращаются в нуль.

В *вакууме* электромагнитные волны распространяются со скоростью света \vec{c} , *независимо от частоты колебаний*. **Ф а з о в а я с к о р о с т ь** электромагнитных волн в среде

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}},$$

где ϵ и μ — диэлектрическая и магнитная проницаемость среды.

Электромагнитные волны поглощаются, отражаются и преломляются, как, собственно, и другие виды волн, что доказано опытами Герца.

Из теории Максвелла следует, что электромагнитные волны должны оказывать на тела давление. **Давление электромагнит-**

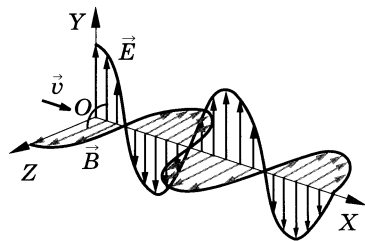


Рис. 117

ных волн объясняется тем, что под действием электрического поля волны заряженные частицы вещества начинают упорядоченно двигаться и подвергаются со стороны магнитного поля волны действию сил Лоренца. Однако значение этого давления ничтожно мало. При средней мощности солнечного излучения, приходящего на Землю, давление для абсолютно поглощающей поверхности составляет примерно 5 мкПа. В исключительно тонких экспериментах, ставших классическими, П. Н. Лебедев доказал существование светового давления на твердые тела и газы. Опыты Лебедева имели огромное значение для подтверждения выводов теории Максвелла о том, что свет представляет собой электромагнитные волны.

АБЕРРАЦИИ ЛИНЗ — погрешности (искажения), даваемые линзой.

1. **Сферическая aberrация.** Если расходящийся пучок света падает на линзу, то лучи после преломления пересекаются в точке S' (на расстоянии OS' от оптического центра линзы), а лучи, более удаленные от оптической оси, — в точке S'' , ближе к линзе (рис. 118). В результате изображение светящейся точки на экране, перпендикулярном оптической оси, будет в виде расплывчатого пятна. Этот вид погрешности, связанный со сферичностью преломляющих поверхностей, называется **сферической aberrацией**. Количественной мерой сферической aberrации является отрезок $\delta = OS'' - OS'$. Применяя диафрагмы, можно сферическую aberrацию уменьшить, однако при этом снижается светосила линзы. Сферическую aberrацию можно практически устранить, составляя системы из собирающих ($\delta < 0$) и рассеивающих ($\delta > 0$) линз.

2. **Хроматическая aberrация.** При падении на оптическую систему белого света отдельные составляющие его монохроматические лучи фокусируются в разных точках (наибольшее

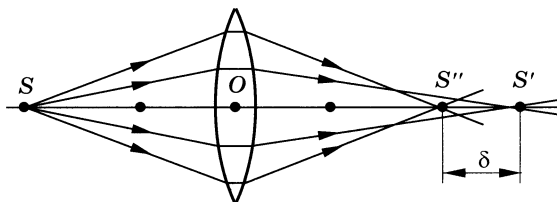


Рис. 118

фокусное расстояние имеют красные лучи, наименьшее — фиолетовые), поэтому изображение получается размытым и окрашенным по краям. Это явление называется **хроматической аберрацией**. Так как разные сорта стекол обладают различной дисперсией, то, комбинируя собирающие и рассеивающие линзы из различных стекол, можно совместить фокусы двух (**ахроматы**) и трех (**апохроматы**) различных цветов, устранив тем самым хроматическую аберрацию.

3. Кома. Если через оптическую систему проходит широкий пучок от светящейся точки, расположенной не на оптической оси, то получаемое изображение этой точки будет в виде светового пятна, напоминающего кометный хвост. Такая погрешность линз называется **комой**.

4. Астигматизм. Погрешность, обусловленная неодинаковостью кривизны оптической поверхности в разных плоскостях сечения падающего на нее светового пучка, называется **астигматизмом**. Так, изображение точки, удаленной от главной оптической оси, наблюдается на экране в виде расплывчатого пятна эллиптической формы. Это пятно в зависимости от расстояния экрана до оптического центра линзы вырождается либо в вертикальную, либо в горизонтальную прямую. Астигматизм исправляется подбором радиусов кривизны преломляющих поверхностей и их фокусных расстояний.

ГЮЙГЕНСА ПРИНЦИП: каждая точка среды, до которой доходит волна, служит центром вторичных волн, а огибающая этих волн представляет волновой фронт (волновую поверхность) в следующий момент времени (рис. 119, а).

Принцип Гюйгенса — *геометрический принцип*. Он не затрагивает по существу вопроса об амплитуде, а следовательно, и об интенсивности распространяющихся световых волн. Он позволяет анализировать распространение света и вывести законы отражения и преломления.

Закон отражения света (вывод на основе принципа Гюйгенса) (рис. 119, б). Пусть на границу раздела двух сред падает плоская волна (фронт волны — плоскость *AB*), распространяющаяся вдоль направления *I*. Когда фронт волны достигнет отражающей поверхности в точке *A*, эта точка начнет излучать вторичную волну. Для прохождения волной расстояния

BC требуется время $\Delta t = BC/v$. За это же время фронт вторичной волны достигнет точек полусферы, радиус AD которой равен $v\Delta t = BC$. Положение фронта отраженной волны в этот момент времени в соответствии с принципом Гюйгенса задается плоскостью DC , а направление распространения этой волны — лучом II . Из равенства треугольников ABC и ADC вытекает закон отражения: *угол отражения β равен углу падения α* .

Закон преломления (вывод на основе принципа Гюйгенса) (рис. 119, в). Плоская волна (фронт волны — плоскость AB), распространяющаяся в вакууме вдоль направления I со скоростью света c , падает на границу раздела со средой, в которой скорость ее распространения равна v . Пусть время прохождения волной пути BC равно Δt . Тогда $BC = c\Delta t$. За это же время фронт волны, возбуждаемый точкой A

и распространяющийся в среде со скоростью v , достигнет точек полусферы, радиус которой $AD = v\Delta t$. Положение фронта преломленной волны в этот момент времени в соответствии с принципом Гюйгенса задается плоскостью DC , а направление ее распространения — лучом III . Из рис. 119, в следует, что $AC = BC/\sin \alpha = AD/\sin \gamma$, т. е. $c\Delta t/\sin \alpha = v\Delta t/\sin \gamma$, откуда

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{c}{v} = n,$$

где n — показатель преломления.

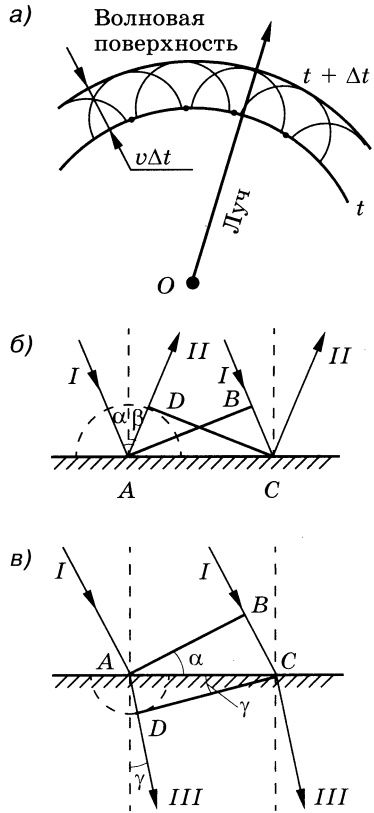


Рис. 119

Таким образом, согласно принципу Гюйгенса, $v < c$, т. е. скорость распространения света в среде меньше скорости его распространения в вакууме, что подтверждается экспериментальными данными.

ДИСПЕРСИЯ СВЕТА — зависимость скорости распространения световой волны в веществе от ее частоты. Поскольку показатель преломления $n = c/v$, то дисперсия света определяется как зависимость показателя преломления вещества n от частоты ν падающего на вещество света.

Следствие дисперсии — разложение в спектр пучка белого света при прохождении его через призму. Пусть *монохроматический* луч света падает на призму под углом α_1 (рис. 120, а), преломляющий угол A призмы, а показатель преломления n . После двукратного преломления (на левой и правой гранях призмы) луч оказывается отклоненным на угол φ . Из рис. 120, а следует, что

$$\varphi = (\alpha_1 - \gamma_1) + (\alpha_2 - \gamma_2) = \alpha_1 + \alpha_2 - A.$$

Если углы A и α_1 малы, то углы α_2 , γ_1 и γ_2 также малы и в законе преломления вместо синусов этих углов можно воспользоваться их значениями. Тогда $\alpha_1/\gamma_1 = n$ и $\gamma_2/\alpha_2 = 1/n$.

Так как

$$\gamma_1 + \gamma_2 = A,$$

$$\text{то } \alpha_2 = \gamma_2 n = n(A - \gamma_1) = n(A - \alpha_1/n) = nA - \alpha_1$$

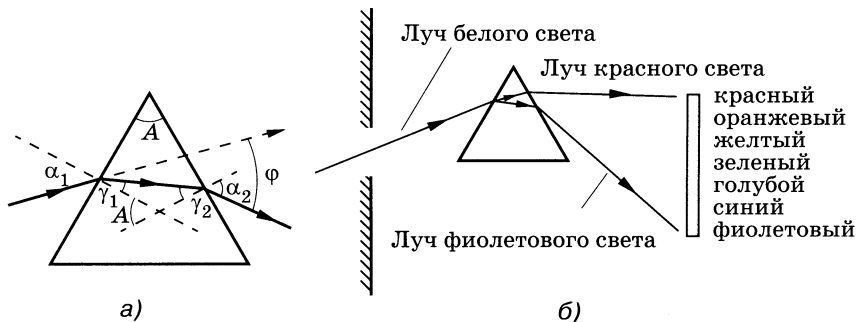


Рис. 120

или

$$\alpha_1 + \alpha_2 = nA.$$

Тогда

$$\varphi = A(n - 1),$$

т. е. угол отклонения лучей призмой тем больше, чем больше ее преломляющий угол.

Поскольку n — функция длины волны, то лучи разных длин волн после прохождения призмы окажутся отклоненными на разные углы, т. е. пучок белого света за призмой разлагается в спектр, что и наблюдалось И. Ньютоном. Видимая радужная полоска, появляющаяся за призмой (рис. 120, б) и состоящая из семи цветов, называется **призматическим (дисперсионным) спектром**. Отдельные цвета спектра (возникающие за призмой цветовые полосы) называются **спектральными цветами**.

Области длин волн, отвечающие спектральным цветам:

Ультрафиол. — Фиол. — Син. — Зел. — Желт. — Оранж. — Красн. — Инфракр.
390 — 435 — 495 — 570 — 590 — 630 — 770 нм

Дисперсия проявляется лишь при распространении *немонохроматического света*.

ДИФРАКЦИОННАЯ РЕШЕТКА — совокупность параллельных щелей равной ширины, лежащих в одной плоскости и разделенных равными по ширине непрозрачными промежутками. Например, если взять отполированное стекло, на котором алмазом нанесены тонкие параллельные линии, то они действуют как непрозрачные промежутки, а не тронутые алмазом места соответствуют щелям.

На рис. 121 щели дифракционной решетки шириной a чередуются с непрозрачными участками шириной b . **Период дифракционной решетки** $d = a + b$. Свет падает нормально к плоскости решетки.

Когда фронт волны достигнет плоскости решетки, то, согласно принципу Гюйгенса—Френеля, каж-

дая щель становится источником когерентных вторичных волн, способных интерферировать друг с другом. На экране Э, расположенном в фокальной плоскости собирающей линзы Л, в результате интерференции света от различных щелей будут наблюдаться дифракционные максимумы и минимумы.

Поскольку щели находятся на одинаковых расстояниях друг от друга, то оптическая разность хода Δ лучей, идущих от соответствующих точек соседних щелей, для данного направления φ будет одинакова в пределах всей дифракционной решетки:

$$\Delta = (a + b) \sin \varphi = d \sin \varphi.$$

В тех направлениях (т. е. для таких углов φ), для которых *оптическая разность хода равна четному числу полуволн*, будут наблюдаться максимумы. **Условие дифракционных максимумов:**

$$d \sin \varphi = \pm 2k \frac{\lambda}{2} \quad (k = 0, 1, 2 \dots). \quad (1)$$

По обе стороны от центрального максимума (ему соответствует $k = 0$) располагаются первые максимумы — правый ($k = +1$) и левый ($k = -1$), далее вторые и т. д. Между дифракционными максимумами расположены минимумы освещенности. Чем большее число щелей содержит дифракционная решетка, тем бóльшая световая энергия пройдет сквозь решетку, тем более интенсивными и более острыми будут максимумы.

Если в формуле (1) принять $\sin \varphi \leq 1$, то *число максимумов*, наблюдаемое с помощью дифракционной решетки,

$$k \leq \frac{d}{\lambda}.$$

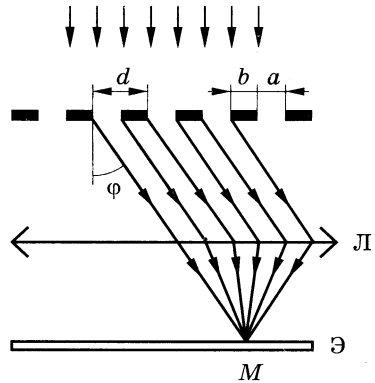


Рис. 121

Положение максимумов зависит от длины волны λ . Поэтому при пропускании через решетку белого света все максимумы, кроме центрального ($k = 0$), разложатся в спектр, фиолетовая область которого будет обращена к центру дифракционной картины, красная — наружу. Это свойство дифракционной решетки используется для исследования спектрального состава света (определения длин волн и интенсивностей всех монохроматических компонентов), т. е. *дифракционная решетка может быть использована как спектральный прибор*.

ДИФРАКЦИЯ ВОЛН — огибание волнами препятствий, встречающихся на пути, и проникновение волн в область за препятствиями. В более общем понимании — любое отклонение при распространении волн от законов геометрической оптики.

Благодаря дифракции волны могут проникать в область геометрической тени, огибать препятствия, проникать сквозь малые отверстия в экранах и т. д. Это явление объяснено Френелем. Представление о том, что каждая точка волнового фронта является источником вторичных волн (принцип Гюйгенса), Френель дополнил двумя утверждениями: 1) эти источники когерентны; 2) испускаемые ими вторичные волны интерferируют. Эти обобщения получили название **принципа Гюйгенса—Френеля**.

Дифракция характерна для волновых процессов любой природы. Например, звук слышен за углом дома, в лесу голоса перекликающихся людей слышны за деревьями и т. д. Дифракция волн отчетливо наблюдается в случае, когда линейные размеры препятствий меньше или сравнимы с длиной волны.

ДИФРАКЦИЯ СВЕТА — частный случай дифракции волн, а именно явление, наблюдаемое при распространении света в среде вблизи непрозрачных тел, сквозь малые отверстия и связанное с отклонениями от законов геометрической оптики.

Дифракция приводит, например, к проникновению света в область геометрической тени. Поскольку длина световой волны очень мала, то огибание световыми волнами препятствий

незначительно. Поэтому, чтобы *отчетливо* наблюдать дифракцию света, надо использовать либо очень малые препятствия (размером порядка длины световой волны), либо помещать экран на большие расстояния от препятствий.

Дифракция света объясняется на основе принципа Гюйгенса — Френеля. Любая точка волновой поверхности рассматривается как источник вторичных сферических волн, а световые колебания в какой-то точке находятся сложением колебаний, создаваемых приходящими в эту точку вторичными волнами, *с учетом их амплитуд и фаз*. Поскольку вторичными (фиктивными) источниками являются точки волновой поверхности, то все эти фиктивные источники действуют в одинаковой фазе и являются когерентными. Таким образом, для определения в некоторой точке пространства результирующей интенсивности надо учесть интерференцию всех этих вторичных волн. В результате может оказаться так, что там, где пролегает прямолинейный путь от источника света, будет темная область, а в пределах геометрической тени — светлая область (световые лучи огибают препятствие).

Дифракция света определяет границы применимости геометрической оптики. Закон прямолинейного распространения света выполняется достаточно точно только в том случае, когда линейные размеры препятствий на пути распространения света гораздо больше длины световой волны.

ДИФРАКЦИЯ СВЕТА НА ЩЕЛИ — практически важный случай дифракции плоских световых волн, или **дифракция в параллельных лучах**, которая наблюдается в том случае, когда *источник света и точка наблюдения бесконечно удалены от препятствия, вызвавшего дифракцию*. Чтобы этот тип дифракции осуществить, достаточно точечный источник света поместить в фокусе собирающей линзы, а дифракционную картину исследовать в фокальной плоскости второй собирающей линзы, установленной за препятствием.

Пусть на непрозрачный экран с узкой щелью (рис. 122) падает перпендикулярно экрану пучок параллельных лучей

монохроматического света. Когда фронт волны достигнет щели AB , то каждая точка волнового фронта станет источником вторичных волн. Расположив в фокальной плоскости собирающей линзы L экран \mathcal{E} , можно наблюдать результат интерференции этих волн, распространяющихся от щели под произвольными углами к первоначальному направлению (на рис. 122 показаны два параллельных луча, сходящихся после преломления в точке M фокальной плоскости).

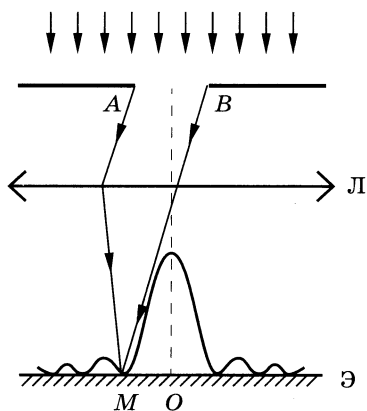


Рис. 122

На экране, вследствие дифракции света на щели, получим **дифракционный спектр**: центральный максимум расположен против центра щели, а по обе стороны от него наблюдаются минимумы и максимумы (см. рис. 122). Положение дифракционных максимумов зависит от длины световой волны, поэтому при освещении щели *белым светом* центральный максимум будет в виде белой полосы (он общий для всех длин волн), а боковые максимумы радужно окрашены (фиолетовый край их обращен к центру дифракционной картины). Однако боковые максимумы настолько расплывчатые, что отчетливого разделения различных длин волн с помощью дифракции на одной щели получить невозможно.

ЗАКОНЫ ОПТИКИ ОСНОВНЫЕ

Законы прямолинейного распространения света: свет в оптически однородной среде распространяется прямолинейно. **Оптически однородная среда** — среда, показатель преломления которой везде одинаков.

Доказательством этого закона является наличие тени с резкими границами от непрозрачных предметов при освещении их точечными источниками света (источники, размеры которых значительно меньше освещаемого предмета и расстояния

до него). Тщательные эксперименты показали, однако, что этот закон нарушается, если свет проходит сквозь очень малые отверстия, причем отклонение от прямолинейности распространения тем больше, чем меньше отверстия.

Закон независимости световых пучков: *эффект, производимый отдельным пучком, не зависит от того, действуют ли одновременно остальные пучки или они отсутствуют.* Разбивая световой поток на отдельные световые пучки (например, с помощью диафрагм), можно показать, что действие выделенных световых пучков независимо.

Если свет падает на границу раздела двух сред (двух прозрачных веществ), то падающий луч (рис. 123) разделяется на два — отраженный и преломленный, направления которых задаются *законами отражения и преломления.*

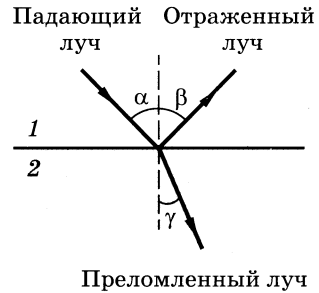


Рис. 123

Закон отражения: *отраженный луч лежит в одной плоскости с падающим лучом и перпендикуляром, проведенным к границе раздела двух сред в точке падения; угол отражения β равен углу падения α :*

$$\beta = \alpha.$$

Закон преломления: *луч падающий, луч преломленный и перпендикуляр, проведенный к границе раздела в точке падения, лежат в одной плоскости; отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для данных сред:*

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n_{21}, \tag{1}$$

где n_{21} — **относительный показатель преломления** (показатель преломления второй среды относительно первой).

Относительный показатель преломления двух сред равен отношению их абсолютных показателей преломления:

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1}. \tag{2}$$

Абсолютным показателем преломления среды называется величина n , равная отношению скорости c электромагнитных волн в вакууме к их фазовой скорости v в среде:

$$n = \frac{c}{v}. \quad (3)$$

Учитывая формулы (2) и (3), закон преломления (1) можно записать в виде:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}.$$

ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ ВОЛН — явление, заключающееся в том, что при наложении *когерентных волн* в одних местах пространства колебания усиливают друг друга, а в других — ослабляют. **Когерентные волны** — волны, имеющие *одинаковую частоту и постоянную во времени разность фаз*. *Интерференция присуща волнам любой природы.*

Для примера рассмотрим сложение двух волн, возбуждаемых на поверхности воды двумя вибраторами S_1 и S_2 , совершающими совпадающие по фазе гармонические колебания с одинаковыми амплитудой и частотой. Результат сложения волн в рассматриваемой точке M (рис. 124) зависит от **разности хода волн** — разности расстояний d_1 и d_2 от точки M до вибраторов S_1 и S_2 .

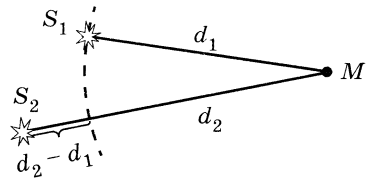


Рис. 124

Если *разность хода волн*

$$d_2 - d_1 = 2k \frac{\lambda}{2} \quad (k = 0, 1, 2, \dots), \quad (1)$$

т. е. равна *четному числу полуволн*, то волны придут в точку M в *одинаковых фазах* и усилят друг друга. Таким образом, условие (1) — **условие интерференционного максимума**.

Если *разность хода волн*

$$d_2 - d_1 = (2k + 1) \frac{\lambda}{2} \quad (k = 0, 1, 2, \dots), \quad (2)$$

т. е. равна *нечетному числу полуволн*, то волны придут в точку *M* в *противофазе* и *погасят друг друга*. Условие (2) — **условие интерференционного минимума**.

Ослабление колебаний в одних местах пространства и усиление — в других в случае интерференции волн свидетельствует о том, что происходит *перераспределение энергии колебаний в пространстве, причем строго в соответствии с законом сохранения энергии*. Энергия распределяется в пространстве неравномерно: в местах интерференционных максимумов энергия результирующих колебаний больше суммы энергий интерферирующих волн, в местах интерференционных минимумов — меньше.

ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА — *частный случай и н т е р ф е р е н ц и и волн*, а именно явление, заключающееся в том, что при наложении *когерентных световых волн* происходит пространственное перераспределение светового потока: в одних местах возникают максимумы, в других — минимумы интенсивности.

Когерентными являются **монохроматические волны** — неограниченные в пространстве волны одной определенной и строго постоянной частоты. Так как ни один реальный источник не дает строго монохроматического света, то волны, излучаемые любыми независимыми источниками света, всегда некогерентны. Поэтому на опыте не наблюдается интерференция света от независимых источников, например от двух электрических лампочек.

Как можно создать условия, необходимые для возникновения интерференции световых волн? Для получения когерентных световых волн применяют метод разделения волны на две части, которые после прохождения разных *оптических путей* накладываются друг на друга, при этом наблюдается интерференционная картина. До появления *лазеров* во всех приборах для наблюдения интерференции света когерентные пучки получали разделением и последующим сведением световых лучей, исходящих из одного и того же источника. Практически это можно осуществить с помощью экранов и щелей, зеркал и преломляющих тел.

Пусть разделение на две когерентные волны происходит в определенной точке O (рис. 125). До точки M , в которой наблюдается интерференционная картина, одна волна в среде с показателем преломления n_1 прошла путь s_1 , вторая — в среде с показателем преломления n_2 — путь s_2 . Если в точке O фаза колебаний равна ωt , то в точке M первая волна возбуждит колебание $A_1 \cos \omega(t - s_1/v_1)$, вторая волна — колебание $A_2 \cos \omega(t - s_2/v_2)$, где $v_1 = c/n_1$, $v_2 = c/n_2$ — соответственно фазовая скорость первой и второй волны. Разность фаз колебаний, возбуждаемых волнами в точке M , равна

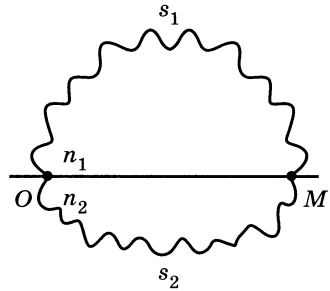


Рис. 125

$$\varphi = \omega \left(\frac{s_2}{v_2} - \frac{s_1}{v_1} \right) = \frac{2\pi}{\lambda} (s_2 n_2 - s_1 n_1) = \frac{2\pi}{\lambda} (L_2 - L_1) = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta$$

(учли, что $\omega/c = 2\pi\nu/c = 2\pi/\lambda$, где λ — длина волны в вакууме). Произведение геометрической длины пути s световой волны в данной среде на показатель преломления n этой среды называется **оптической длиной пути** L , а $\Delta = L_2 - L_1$ — разность оптических длин проходимых волнами путей — называется **оптической разностью хода**.

Если *оптическая разность хода равна четному числу полуволн*

$$\Delta = \pm 2k \frac{\lambda}{2} \quad (k = 0, 1, 2, \dots), \quad (1)$$

то $\varphi = \pm 2\pi$, и *колебания, возбуждаемые в точке M обеими волнами, будут происходить в одинаковой фазе*, т. е. условие (1) — **условие интерференционного максимума**.

Если *оптическая разность хода равна нечетному числу полуволн*

$$\Delta = \pm (2k + 1) \frac{\lambda}{2} \quad (k = 0, 1, 2, \dots), \quad (2)$$

то $\varphi = \pm(2m + 1)\pi$, и *колебания*, возбуждаемые в точке M обеими волнами, *будут происходить в противофазе*, т. е. условие (2) — условие **интерференционного минимума**.

ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ. В природе часто можно наблюдать радужное окрашивание тонких пленок (масляные пленки на воде, мыльные пузыри, оксидные пленки на металлах), возникающие в результате интерференции света, отраженного двумя поверхностями пленки.

Пусть на плоскопараллельную прозрачную пленку падает пучок света (для простоты показан только луч I), который на поверхности пленки в точке O разделяется на два: один отражается от верхней поверхности пленки, а другой преломляется (рис. 126). Преломленный луч, дойдя до точки C , частично преломится в воздух, а частично отразится и пойдет к точке B . Здесь он опять частично отразится (этот ход луча в дальнейшем из-за малой интен-

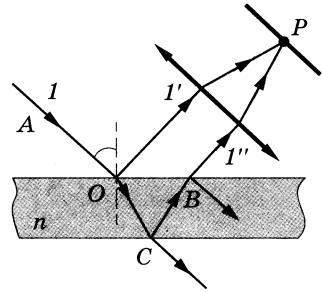


Рис. 126

сивности не рассматриваем) и преломится, выходя в воздух. Вышедшие из пленки лучи I' и I'' когерентны. Если на их пути поставить собирающую линзу, то они сойдутся в одной из точек P фокальной плоскости линзы. В результате возникает интерференционная картина, которая определяется оптической разностью хода между интерферирующими лучами, зависящей от толщины пленки (ее толщина должна быть сравнима с длиной волны падающего света) и ее материала. Если оптическая разность хода равна четному числу полуволн, то в точке P наблюдается максимум, если нечетному числу полуволн, то — минимум.

Поскольку белый свет *немонохроматичен* (содержит электромагнитные волны с длиной волны от 390 до 750 нм), а оптическая разность хода зависит от длины волны, то максимумы интерференционной картины для разных волн оказываются в разных точках экрана (или приемника, например, сетчатки глаза), поэтому пленки и кажутся радужно окрашенными.

ИНТЕРФЕРОМЕТР — точный измерительный прибор, принцип работы которого основан на интерференции волн. Интерферометры существуют для звуковых и для электромагнитных волн.

Все интерферометры основаны на одном и том же принципе и различаются лишь конструкционно. На рис. 127 представлена упрощенная схема интерферометра Майкельсона. Монохроматический свет от источника S падает под углом 45° на плоскопараллельную пластину P_1 . Сторона пластинки, удаленная от S , посеребренная и полупрозрачная, разделяет луч на две части: луч 1 (отражается от посеребренного слоя) и луч 2 (проходит через него). Луч 1 отражается от зеркала M_1 и, возвращаясь обратно, вновь проходит через пластинку P_1 (луч $1'$).

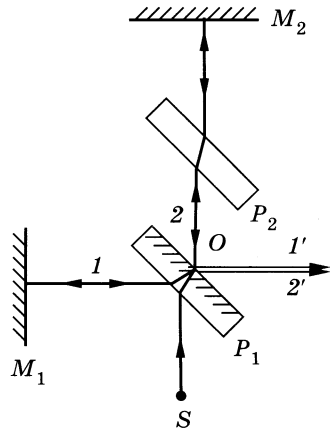


Рис. 127

Луч 2 идет к зеркалу M_2 , отражается от него, возвращается обратно и отражается от пластинки P_1 (луч $2'$). Так как первый из лучей проходит сквозь пластинку P_1 дважды, то для компенсации возникающей разности хода на пути второго луча ставится пластинка P_2 (точно такая же, как и P_1 , только не покрытая слоем серебра).

Лучи $1'$ и $2'$ когерентны; следовательно, будет наблюдаться интерференция, результат которой зависит от оптической разности хода луча 1 от точки O до зеркала M_1 и луча 2 от точки O до зеркала M_2 . При перемещении одного из зеркал на расстояние $\lambda/4$ разность хода обоих лучей увеличится на $\lambda/2$ и произойдет смена освещенности зрительного поля. Следовательно, по незначительному смещению интерференционной картины можно судить о малом перемещении одного из зеркал и использовать интерферометр Майкельсона для точного (порядка 10^{-7} м) измерения длин (измерения длины тел, дли-

ны волны света, изменения длины тела при изменении температуры).

ИНФРАКРАСНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ — электромагнитное излучение, занимающее в спектре электромагнитных волн область между красным концом спектра видимого излучения ($\lambda > 760$ нм) и началом спектра миллиметровых волн радиодиапазона ($\lambda < 1$ мм).

Источники инфракрасного излучения — все нагретые тела. Источники делятся на *искусственные* — любые тела, температура которых выше температуры окружающей среды (печь, батареи отопления, электрическая лампочка); и *естественные* — Солнце, звезды, планеты. Инфракрасное излучение можно обнаружить по его тепловому действию — нагреванию тел, которые его поглощают. Поэтому его часто называют *тепловым*. Используется для сушки окрашенных поверхностей, в фотографии (можно снимать в любое время суток), в приборах ночного видения и т. д.

ЛИНЗЫ — прозрачные тела, ограниченные двумя поверхностями (одна из них обычно сферическая, иногда цилиндрическая, а вторая — сферическая или плоская), преломляющими световые лучи, способные формировать оптические изображения предметов. Материалом для линз служат стекло, кварц, кристаллы, пластмассы и т. п. По внешней форме (рис. 128, а) линзы различают: 1) двояковыпуклые; 2) плосковыпуклые; 3) двояковогнутые; 4) плосковогнутые; 5) выпукло-вогнутые;

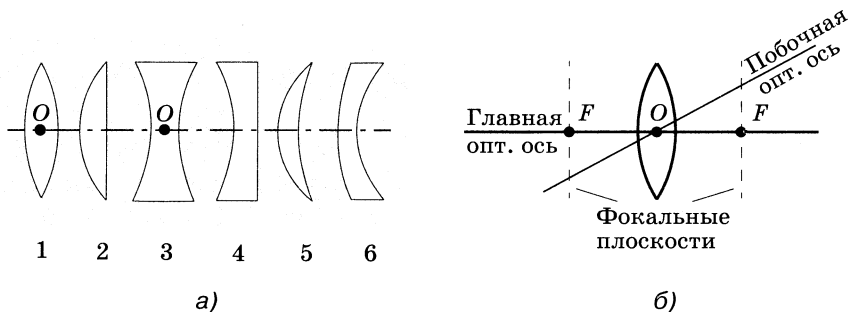


Рис. 128

б) вогнуто-выпуклые. По оптическим свойствам *линзы* делятся на *собирающие и рассеивающие*.

Линза называется **тонкой**, если ее толщина (расстояние между ограничивающими поверхностями) значительно меньше радиусов поверхностей, ограничивающих линзу.

Главная оптическая ось — прямая, проходящая через центры кривизны поверхностей линзы. **Оптический центр линзы** — точка, лежащая на главной оптической оси и обладающая тем свойством, что лучи проходят через нее не преломляясь. Для двояковыпуклой и двояковогнутой линз оптический центр O совпадает с геометрическим центром средней части линзы.

Побочная оптическая ось — любая прямая, проходящая через оптический центр линзы и не совпадающая с главной оптической осью (рис. 128, б). **Фокус линзы** — точка F , лежащая на главной оптической оси, в которой пересекаются все лучи *параксиального (приосевого)* светового пучка, распространяющиеся параллельно главной оптической оси. **Фокальные плоскости** — плоскости, проходящие через фокусы линзы перпендикулярно ее главной оптической оси. **Фокусное расстояние f линзы** — расстояние между оптическим центром линзы и ее фокусом.

Оптическая сила линзы — величина, обратная фокусному расстоянию:

$$\Phi = \frac{1}{f}.$$

Если $\Phi > 0$, то линза *собирающая*, если $\Phi < 0$, то — *рассеивающая*.

Единица оптической силы линзы — **диоптрия (дптр)**: 1 дптр — оптическая сила линзы с фокусным расстоянием 1 м (1 дптр = 1/м).

Формула тонкой линзы для параксиальных лучей:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f},$$

где a и b — соответственно расстояния от линзы (от ее оптического центра) до предмета и его изображения. Для рассеивающей линзы b и f следует брать отрицательными.

Построение изображений в линзах см. Построение изображения предмета в линзах.

ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ — неравновесное излучение, избыточное при данной температуре над тепловым излучением тела и имеющее длительность, бóльшую периода световых колебаний. Из первой части этого определения следует вывод, что люминесценция не является тепловым излучением, поскольку любое тело при температуре выше 0 К излучает электромагнитные волны, а такое излучение является тепловым. Из второй части вытекает, что люминесценция не является таким видом свечения, как отражение и рассеяние света. Период световых колебаний составляет примерно 10^{-15} с, поэтому длительность, по которой свечение можно отнести к люминесценции, больше — примерно 10^{-10} с. Признак длительности свечения дает возможность отличить люминесценцию от других неравновесных процессов.

В зависимости от способов возбуждения различают: **фотолюминесценцию** (под действием света), **рентгенолюминесценцию** (под действием рентгеновского излучения), **катодолюминесценцию** (под действием электронов), **электролюминесценцию** (под действием электрического поля), **радиолюминесценцию** (при возбуждении ядерным излучением, например γ -излучением, нейтронами, протонами), **хемилюминесценцию** (при химических превращениях), **триболлюминесценцию** (при растирании и раскалывании некоторых кристаллов, например сахара). По длительности свечения условно различают: **флуоресценцию** ($t \leq 10^{-8}$ с) и **фосфоресценцию** — свечение, продолжающееся заметный промежуток времени после прекращения возбуждения.

Вещества, способные под действием различного рода возбуждений светиться, получили название **люминофоров**. Явление люминесценции получило широкое применение в практике, например **люминесцентный анализ** — метод определения состава вещества по характерному его свечению. **Люминесцентная де-**

Фектоскопия позволяет обнаружить тончайшие трещины на поверхности деталей машин и других изделий (исследуемая поверхность покрывается для этого люминесцентным раствором, который после удаления остается в трещинах). Люминофоры используются в люминесцентных лампах, являются активной средой оптических квантовых генераторов.

НЬЮТОНА КОЛЬЦА — интерференционная картина, наблюдающаяся при отражении света от воздушного зазора, образованного плоскопараллельной пластинкой и соприкасающейся с ней в точке O плосковыпуклой линзой с большим радиусом кривизны (рис. 129). Рассматривая два монохроматических параллельных луча, можно увидеть, что луч 1 проходит воздушный зазор дважды и в точке B интерферирует с лучом 2 . В случае освещения установки монохроматическим светом интерференционная картина имеет вид светлых (определенного цвета) и темных колец (кольца возникают потому, что для всех точек, равноотстоящих от оси линзы, оптическая разность хода одинакова). В случае освещения белым светом в месте соприкосновения линзы и пластинки в отраженном свете наблюдается темное кольцо, вокруг которого располагаются радужные кольца. Измерив диаметры соответствующих колец, по определенным формулам можно определить длину волны падающего на установку света или радиус кривизны линзы.

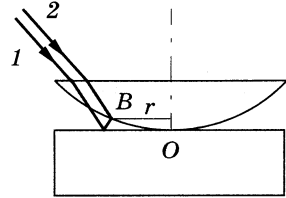


Рис. 129

ОПТИКА, СТРУКТУРА — раздел физики, в котором изучаются излучение, распространение и взаимодействие с веществом световых волн.

Оптика делится на *геометрическую* и *волновую*. **Геометрическая оптика** — раздел оптики, в котором законы распространения света рассматриваются на основе представления о *световых лучах*. **Световые лучи** — нормальные к волновым поверхностям линии, вдоль которых распространяется поток световой энергии. В геометрической оптике не рассматривается вопрос о природе света и не учитываются его волновые свойства. Она является основой теории оптических приборов.

Волновая оптика — раздел оптики, изучающий совокупность явлений, в которых проявляется волновая природа света.

ПЛОСКОЕ ЗЕРКАЛО — плоская полированная поверхность, при отражении от которой параллельный пучок света остается параллельным. На рис. 130 показано построение изображения точечного источника S в плоском зеркале. Два произвольных луча 1 и 2, исходящих из точки S , отражаясь от зеркала в соответствии с законом отражения, расходятся. Продолжения этих лучей пересекаются в точке S' , находящейся по другую сторону зеркала относительно S . Точка S' и является *мнимым* изображением точечного источника, оно получается за счет пересечения не самих лучей, а их продолжений. Линия SS' перпендикулярна к плоскости зеркала, причем $SO = OS'$.

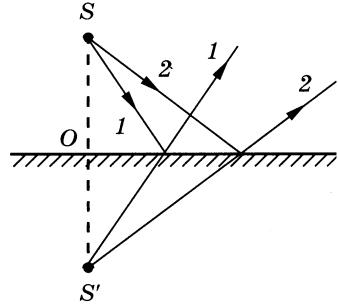


Рис. 130

Изображение предмета в плоском зеркале всегда мнимое, прямое, равное по величине самому предмету, но зеркально симметричное (отражение, например, левой стороны предмета является правой стороной изображения).

ПОЛНОЕ ОТРАЖЕНИЕ. Пусть свет распространяется из **оптически более плотной среды** (среды с большим показателем преломления) в оптически менее плотную среду (среду с меньшим показателем преломления), например из воды в воздух. Согласно **закону преломления**

$$\frac{\sin \gamma}{\sin \alpha} = \frac{n_1}{n_2} > 1,$$

т. е. угол преломления γ больше, чем угол падения α (рис. 131, а).

С увеличением угла падения увеличивается угол преломления (рис. 131, б, в) до тех пор, пока при некотором угле падения ($\alpha = \alpha_{\text{пр}}$) угол преломления не окажется равным $\pi/2$. Угол $\alpha_{\text{пр}}$ называется **предельным углом**. При $\alpha > \alpha_{\text{пр}}$ весь падающий свет полностью отражается (рис. 131, г). По мере прибли-

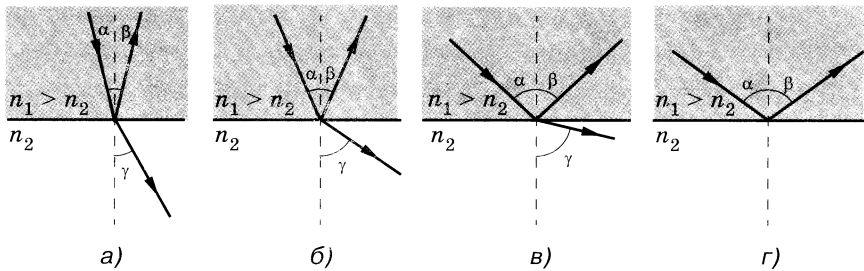


Рис. 131

жения угла падения к предельному интенсивность преломленного луча уменьшается, а отраженного — растёт (рис. 131, а—в). Если $\alpha = \alpha_{\text{пр}}$, то интенсивность преломленного луча обращается в нуль, а интенсивность отраженного равна интенсивности падающего (рис. 131, г). Таким образом, *при углах падения от $\alpha_{\text{пр}}$ до $\pi/2$ луч не преломляется, а полностью отражается в первую среду, причем интенсивность отраженного и падающего лучей одинакова*. Это явление получило название **полного отражения**.

Значение предельного угла $\alpha_{\text{пр}}$ найдем в соответствии с законом преломления:

$$\sin \alpha_{\text{пр}} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}.$$

Это уравнение удовлетворяет значениям угла $\alpha_{\text{пр}}$ при $n_2 \leq n_1$. Следовательно, явление полного отражения имеет место только при падении света *из среды оптически более плотной в среду оптически менее плотную*.

Явление полного отражения используется в призмах полного отражения (например, в биноклях), а также **световодах**, представляющих собой тонкие, произвольным образом изогнутые нити (волокна) из оптически прозрачного материала. В оконных деталях применяют стеклянное волокно, световодущая жила (сердцевина) которого окружается стеклом — оболочкой из другого стекла с меньшим показателем преломления. Свет, падающий на торец световода под углами, боль-

шими предельного, претерпевает на поверхности раздела сердцевины и оболочки полное отражение и распространяется только по световедущей жиле.

ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА. Световые волны поперечны: векторы напряженности \vec{E} электрического поля и магнитной индукции \vec{B} магнитного поля волны взаимно перпендикулярны и колеблются перпендикулярно вектору скорости распространения волны \vec{v} (перпендикулярно лучу). Поэтому для описания закономерностей поляризации света достаточно знать поведение лишь одного из векторов. Обычно все рассуждения ведутся относительно **светового вектора** — вектора напряженности \vec{E} электрического поля (это название обусловлено тем, что при действии света на вещество основное значение имеет электрическая составляющая поля волны, действующая на электроны в атомах вещества).

Свет представляет собой суммарное электромагнитное излучение множества атомов. Атомы же излучают световые волны независимо друг от друга, поэтому световая волна, излучаемая телом в целом, характеризуется всевозможными равновероятными колебаниями светового вектора (рис. 132, а); световой луч перпендикулярен плоскости рисунка. В данном случае равномерное распределение векторов \vec{E} объясняется большим числом атомарных излучателей, а равенство амплитудных значений векторов \vec{E} — одинаковой (в среднем) интенсивностью излучения каждого из атомов. Свет со всевозможными равновероятными ориентациями вектора \vec{E} (и, следовательно, \vec{B}) называется **естественным**.

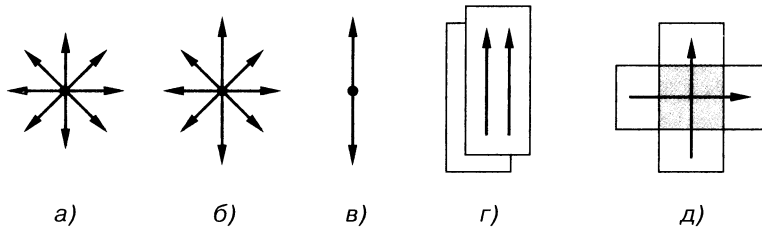


Рис. 132

Свет, в котором направления колебаний светового вектора каким-то образом упорядочены, называется **поляризованным**. Так, если в результате каких-либо внешних воздействий появляется преимущественное (но не исключительное!) направление колебаний вектора \vec{E} (рис. 132, б), то имеем дело с **частично поляризованным светом**. Свет, в котором вектор \vec{E} (и, следовательно, \vec{B}) колеблется только в одном направлении, перпендикулярном лучу (рис. 132, в), называется **плоскополяризованным**.

Плоскость, проходящая через направление колебаний светового вектора плоскополяризованной волны, и направление распространения этой волны, называется **плоскостью поляризации**.

Естественный свет можно преобразовать в плоскополяризованный, используя так называемые **поляризаторы**, пропускающие колебания только определенного направления (например, пропускающие колебания, параллельные главной плоскости поляризатора, и полностью задерживающие колебания, перпендикулярные этой плоскости). В качестве поляризаторов могут быть использованы среды, анизотропные в отношении колебаний вектора \vec{E} , например природные кристаллы турмалина.

Направив естественный свет на две пластинки турмалина, вырезанные определенным образом, и вращая вторую пластинку вокруг направления луча, можно увидеть, что интенсивность прошедшего света через обе пластинки меняется от максимума (рис. 132, з) до минимума (полное гашение света, рис. 132, д). Эти результаты объясняются просто. Первая пластинка турмалина пропускает колебания только определенного направления (на рис. 132, з оно задано вертикальной стрелкой), т. е. преобразует естественный свет в плоскополяризованный (первая пластинка является **поляризатором** света). Вторая пластинка турмалина — **анализатор** света — практически полностью пропускает поляризованный свет, когда плоскости поляризатора и анализатора параллельны (рис. 132, з), и полностью его задерживает, когда поляризатор и анализатор скрещены (рис. 132, д).

ПОСТРОЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ ПРЕДМЕТА В СФЕРИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛАХ.

При построении изображения точки в сферическом зеркале следует воспользоваться любыми двумя лучами из трех (рис. 133, а):

1) луч 1, параллельный главной оптической оси зеркала, который после отражения от зеркала проходит через главный фокус;

2) луч 2, проходящий через главный фокус, который после отражения от зеркала идет параллельно главной оптической оси;

3) луч 3, проходящий через оптический центр зеркала, который после отражения от зеркала идет по тому же направлению назад.

На рис. 133, б—г для примера построены изображения предмета AB в *вогнутом* сферическом зеркале. Если предмет расположен *между фокусом и оптическим центром*: изображение перевернутое, увеличенное, действительное (рис. 133, б); предмет находится *между фокусом и зеркалом*: изображение прямое, увеличенное, мнимое (рис. 133, в); предмет расположен *дальше оптического центра*: изображение перевернутое, уменьшенное, действительное.

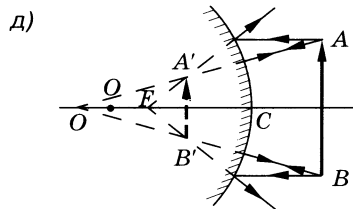
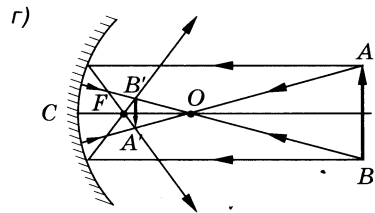
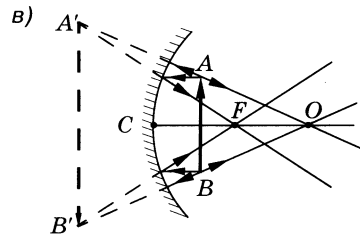
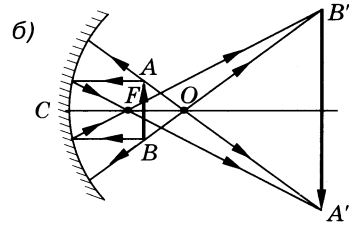
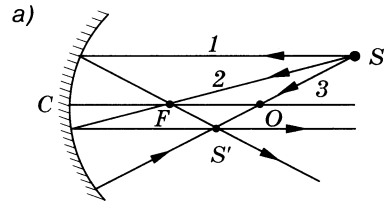


Рис. 133

Из рис. 133, *д* следует, что при любом положении предмета в *выпуклом* зеркале изображение прямое, уменьшенное и мнимое.

ПОСТРОЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ ПРЕДМЕТА В ЛИНЗАХ осуществляется с помощью следующих лучей:

1) луча, идущего параллельно главной оптической оси; после преломления в линзе этот луч (или его продолжение) проходит через второй фокус линзы;

2) луча (или его продолжения), проходящего через первый фокус линзы; после преломления в ней он выходит из линзы параллельно ее главной оптической оси;

3) луча, проходящего через оптический центр линзы и не изменяющего своего направления.

На рис. 134, *а* и *б* для примера построены изображения предмета *AB* в *собирающей* линзе. Если предмет расположен между фокусом и двойным фокусом: изображение перевернутое, увеличенное, действительное (рис. 134, *а*); предмет находится между фокусом и оптическим центром линзы: изображение прямое, увеличенное, мнимое.

Из построения изображения предмета в *рассеивающей* линзе (рис. 134, *в*) следует, что при любом положении предмета изображение прямое, уменьшенное, мнимое.

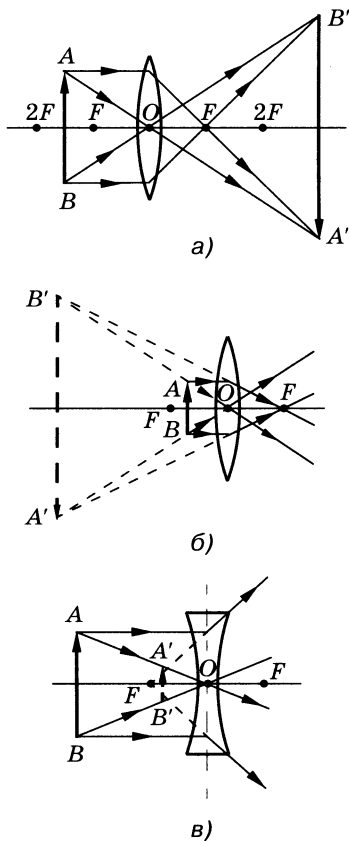


Рис. 134

ПРОСВЕТЛЕНИЕ ОПТИКИ — одно из важнейших применений интерференции для улучшения качества оптических приборов. Прохождение света через каждую преломляющую поверхность линзы, например через границу стекло — воздух, сопровождается отражением $\approx 4\%$ падающего потока (при показателе преломления стекла $\approx 1,5$). Так как современные объективы содержат большое количество линз, то число отражений в них велико, а поэтому велики и потери светового потока. Таким образом, интенсивность прошедшего света ослабляется и светосила оптического прибора уменьшается. Кроме того, отражения от поверхностей линз приводят к возникновению бликов, что часто (например, в военной технике) демаскирует положение прибора.

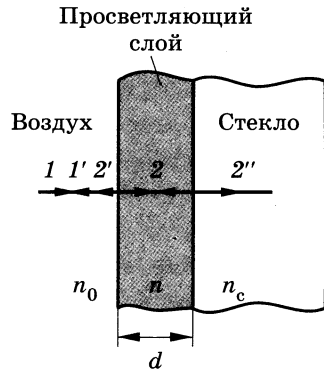


Рис. 135

Для устранения указанных недостатков осуществляют так называемое *просветление оптики*. Для этого на свободные поверхности линз наносят тонкие пленки с показателем преломления меньшим, чем у материала линзы. Для простоты рассмотрим нормальное падение света на пленку. При отражении света от границ раздела воздух — пленка и пленка — стекло возникает интерференция когерентных лучей $1'$ и $2'$ (рис. 135). Толщину пленки d и показатели преломления стекла n_c и пленки n можно подобрать так, чтобы волны, отраженные от обеих поверхностей пленки, гасили друг друга. Для этого необходимо выполнить два условия:

1. Амплитуды отраженных волн должны быть равны. Расчеты показывают, что это условие выполняется, если

$$n = \sqrt{n_c}.$$

2. Разность хода лучей $1'$ и $2'$ должна равняться половине длины волны в пленке.

Разность хода лучей $1'$ и $2'$ равна $2d$. Длина волны λ в пленке с показателем преломления n меньше длины волны λ_0 в вакууме: $\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$. Тогда

$$2d = \frac{\lambda}{2} = \frac{\lambda_0}{2n},$$

откуда

$$nd = \frac{\lambda_0}{4}, \quad (1)$$

где nd — **оптическая толщина пленки**.

Если выполняется условие (1) и оптическая толщина пленки равна $\lambda/4$, то в результате интерференции наблюдается гашение отраженных лучей. Так как добиться одновременного гашения для всех длин волн невозможно, то это обычно делается для наиболее восприимчивой глазом длины волны $\lambda_0 \approx 0,55$ мкм. Поэтому объективы с просветленной оптикой имеют синевато-красный оттенок.

РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ — мера способности оптических приборов давать *раздельные* изображения близких предметов. Поскольку свет имеет *волновую природу*, то даже в оптических системах, в которых нет дефектов и аберраций, точка — объект никогда не получается в виде точки — изображения. Изображение любой светящейся точки в монохроматическом свете представляет собой дифракционную картину, т. е. точечный источник отображается в виде центрального светлого пятна, окруженного чередующимися темными и светлыми кольцами.

Разрешающая способность оптических приборов обусловлена дифракцией. Согласно **критерию Рэлея**, изображения двух близлежащих одинаковых точечных источников или двух близлежащих спектральных линий с равными интенсивностями и одинаковыми симметричными контурами разрешимы (разделены для восприятия), если центральный максимум дифракционной картины от одного источника (линии) совпа-

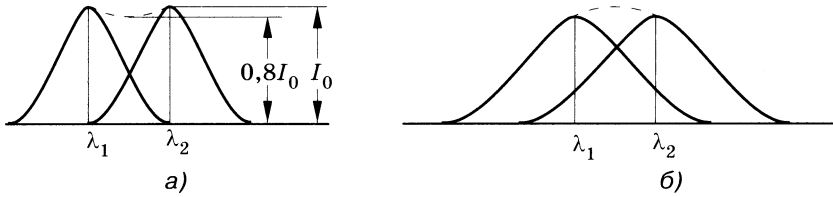


Рис. 136

дает с первым минимумом дифракционной картины от другого (рис. 136, а). При выполнении критерия Рэля интенсивность «провала» между максимумами составляет 80% интенсивности в максимуме, что является достаточным для разрешения линий λ_1 и λ_2 . Если критерий Рэля нарушен, то наблюдается одна линия (рис. 136, б).

РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ — коротковолновое электромагнитное излучение с длинами волн $\lambda \approx 10^{-14} - 10^{-7}$ м. Самым распространенным источником рентгеновского излучения является рентгеновская трубка, в которой сильно ускоренные электрическим полем электроны бомбардируют анод (металлическая мишень из тяжелых металлов, например W или Pt), испытывая на нем резкое торможение. При этом возникает рентгеновское излучение. Волновая природа рентгеновского излучения доказана опытами по дифракции на кристаллах (периоды кристаллических решеток соизмеримы с длинами волн рентгеновского излучения).

Исследование спектрального состава рентгеновского излучения показывает, что его спектр имеет сложную структуру (рис. 137) и зависит как от энергии электронов, так и от материала анода. Спектр представляет собой наложение сплошного спектра, ограниченного со стороны коротких длин волн некоторой границей λ_{\min} , называемой **границей сплошного спектра**, и линейчатого спектра — совокуп-

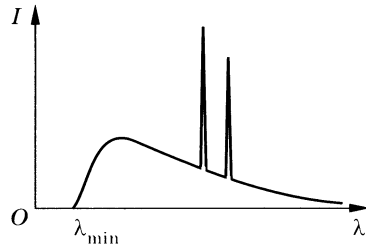


Рис. 137

ности отдельных линий, появляющихся на фоне сплошного спектра.

Исследования показали, что характер сплошного спектра совершенно не зависит от материала анода, а определяется только энергией бомбардирующих анод электронов. Это излучение испускается бомбардирующими анод электронами в результате их торможения при взаимодействии с атомами мишени. Сплошной рентгеновский спектр поэтому называют **тормозным спектром**. Этот вывод находится в согласии с классической теорией излучения, так как при торможении движущихся зарядов должно действительно возникать излучение со сплошным спектром. Из опытов следует, что чем больше кинетическая энергия электронов, вызывающих тормозное рентгеновское излучение, тем меньше λ_{\min} . Это обстоятельство, а также наличие самой границы объясняются к в а н т о в о й т е о р и е й. Очевидно, что предельная энергия к в а н т а соответствует такому торможению, при котором вся кинетическая энергия электрона переходит в энергию кванта, т. е.

$$E_{\max} = h\nu_{\max} = eU,$$

где U — разность потенциалов, за счет которой электрону сообщается энергия E_{\max} , ν_{\max} — частота, соответствующая границе сплошного спектра, $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж · с — постоянная П л а н к а. Тогда граничная длина волны

$$\lambda_{\min} = \frac{c}{\nu_{\max}} = \frac{ch}{eU} = \frac{ch}{E_{\max}},$$

что полностью соответствует экспериментальным данным.

При достаточно большой энергии бомбардирующих анод электронов на фоне сплошного спектра появляются отдельные резкие линии — линейчатый спектр, определяемый материалом анода и называемый **характеристическим рентгеновским спектром**. Особенность этих спектров заключается в том, что атомы каждого химического элемента, независимо от того, находятся ли они в свободном состоянии или входят в химиче-

ское соединение, обладают определенным, присущим только данному элементу линейчатым спектром характеристического излучения.

Рентгеновское излучение широко применяется на практике, например: *рентгеноструктурный анализ* (определение структуры вещества при исследовании дифракционной картины), *рентгенодиагностика* (распознавание новообразований в организме по различному поглощению рентгеновского излучения), *рентгеновская дефектоскопия* (обнаружение дефектов в деталях), *рентгеновская микроскопия* (исследование строения веществ с помощью рентгеновского микроскопа) и т. д.

СВЕТОВЫЕ ВОЛНЫ — электромагнитные волны *оптического диапазона*, примыкающего на шкале электромагнитных излучений с одной стороны к рентгеновскому излучению, а с другой — к микроволновому радиоизлучению.

СПЕКТРЫ, ТИПЫ. Любое вещество, излучающее свет, характеризуется **спектром излучения** — совокупностью частот (или длин волн), излучаемых данным веществом. Различают три основных типа спектров излучения:

1. **Непрерывные спектры** охватывают широкий диапазон длин волн (широкая разноцветная полоса). Характерны для нагретых до высоких температур (раскаленных) твердых и жидких тел, а также сильно сжатых газов. Характер непрерывного спектра определяется как свойствами отдельных излучающих атомов, так и взаимодействием атомов друг с другом.

2. **Линейчатые спектры** представляют собой совокупность отдельных узких спектральных линий, соответствующих дискретным значениям длин волн. Характерны для паров любого химического элемента, для всех веществ в газообразном атомарном (но не молекулярном!) состоянии при невысоких давлениях (когда атомы слабо взаимодействуют друг с другом).

3. **Полосатые спектры** представляют собой совокупность отдельных полос, каждая из которых охватывает некоторый интервал длин волн. Характерны для многоатомных молекул.

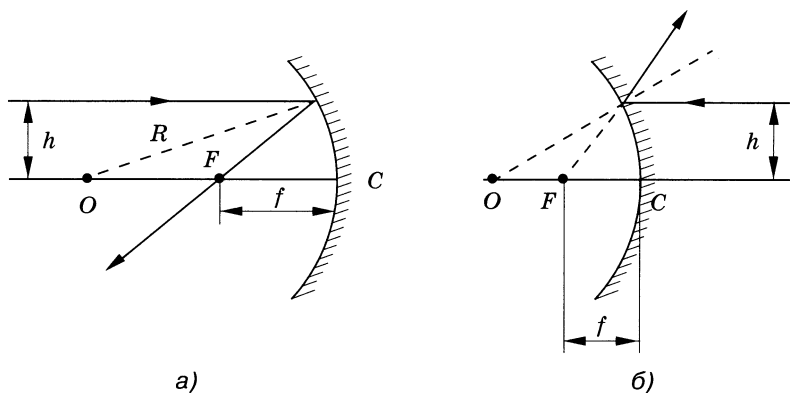


Рис. 138

Спектры поглощения — совокупность частот (длин волн), поглощаемых данным веществом при его облучении. Если свет от источника, дающего сплошной спектр, пропустить через разреженный газ (или пар), то в спектре поглощения газа появятся темные линии (или полосы), которые соответствуют линиям (или полосам) спектра излучения этого же разреженного газа (или пара). Таким образом, положение темных линий в спектре поглощения вещества в газообразном состоянии *при данной температуре* точно совпадает с положением светлых полос в спектре его излучения. Ключ к объяснению этого явления нашел Кирхгоф, обнаруживший, что *любой химический элемент в газообразном состоянии поглощает свет точно таких же длин волн, какие он испускает*.

СФЕРИЧЕСКИЕ ЗЕРКАЛА — зеркала, отражающая поверхность которых представляет собой часть сферы: в случае нанесения отражающего покрытия на *внутреннюю* поверхность — **зеркало вогнутое** (рис. 138, а), на *внешнюю* — **зеркало выпуклое** (рис. 138, б).

Оптический центр зеркала — центр O сферической поверхности, из которой вырезан сегмент. **Полюс зеркала** — вершина C сферического сегмента. **Оптическая ось зеркала** — любая прямая, проходящая через **оптический центр** C . **Глав-**

ная оптическая ось — оптическая ось, проходящая через оптический центр зеркала и его полюс.

Главный фокус (фокус F) зеркала — точка на главной оптической оси, через которую проходит после отражения от зеркала луч (см. рис. 138, *а*) или его продолжение (рис. 138, *б*), падающий параллельно оптической оси. Расстояние $CF = f$ называется **главным фокусным расстоянием**. Для *приосевого пучка* ($h \ll R$, см. рис. 138, *а* и *б*) главное фокусное расстояние

$$f = \frac{R}{2},$$

где R — радиус кривизны зеркала (у выпуклого зеркала фокус мнимый — см. рис. 138, *б*).

Формула сферического зеркала для параксиальных световых пучков:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{2}{R} = \frac{1}{f},$$

где a — расстояние от зеркала до светящейся точки, расположенной на главной оптической оси, b — расстояние от зеркала до изображения. В этой формуле расстояния от зеркала *до действительных точек* следует брать со знаком «+», а расстояния от зеркала *до мнимых точек* — со знаком «-». Фокусное расстояние *вогнутого* зеркала — величина *положительная*, *выпуклого* — *отрицательная*.

Оптическая сила зеркала — величина, обратная главному фокусному расстоянию:

$$\Phi = \frac{1}{f} = \frac{2}{R}.$$

Линейное увеличение зеркала — отношение линейных размеров изображения к линейным размерам предмета:

$$\Gamma = \frac{B}{A}.$$

Построение изображений в зеркалах см. Построение изображения предмета в сферических зеркалах.

ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ — свечение тел, обусловленное нагреванием. Тепловое излучение совершается за счет энергии теплового движения атомов и молекул вещества (т. е. за счет его внутренней энергии) и свойственно всем телам при температуре выше 0 К. Тепловое излучение характеризуется сплошным спектром, положение максимума которого зависит от температуры. При высоких температурах излучаются короткие (видимые и ультрафиолетовые) электромагнитные волны, при низких — преимущественно длинные (инфракрасные).

Тепловое излучение — практически единственный вид излучения, который может быть *равновесным*. Предположим, что нагретое (излучающее) тело помещено в полость, ограниченную идеально отражающей оболочкой. С течением времени, в результате непрерывного обмена энергией между телом и излучением, наступит равновесие, т. е. тело в единицу времени будет поглощать столько же энергии, сколько и излучать. Допустим, что равновесие между телом и излучением по какой-либо причине нарушено и тело излучает энергии больше, чем поглощает. Если в единицу времени тело больше излучает, чем поглощает (или наоборот), то температура тела начнет понижаться (или повышаться). В результате будет ослабляться (или возрастать) количество излучаемой телом энергии, пока, наконец, не установится равновесие.

Исследование теплового излучения сыграло важную роль в создании квантовой механики: для объяснения спектра теплового излучения Планк пришел к идее *квантования энергии излучения*.

УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ — не видимое глазом электромагнитное излучение, занимающее в спектре электромагнитных волн область между фиолетовым концом спектра видимого излучения ($\lambda < 400$ нм) и рентгеновским излучением ($\lambda > 10$ нм).

Источники ультрафиолетового излучения делятся на *искусственные* (накаленные до 3000 К и выше твердые тела, высокотемпературная плазма) и *естественные* (Солнце, звезды, туманности). Ультрафиолетовое излучение обнаруживается по его химическому и биологическому действию (действует на фо-

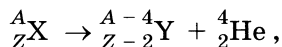
томатериалы, вызывает свечение веществ, действует на кожу и т. д.). Сильно поглощается обычным стеклом и атмосферой Земли. Прозрачными для ультрафиолетового излучения являются кварцевое стекло и различные искусственные кристаллы, которые и используются для исследования его отражения и преломления. Используется для исследования структуры атомов, молекул и твердых тел, в газоразрядных лампах, в криминалистике и искусствоведении, в медицине и т. д.

ФИЗИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ В ОПТИКЕ — **точечный источник** — источник света, линейными размерами которого в данной задаче можно пренебречь.

КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

Адроны — большой класс элементарных частиц (см. также *Элементарные частицы, классификация*), участвуют (кроме гравитационного) в сильном взаимодействии, наряду с электромагнитным и слабым. Адроны в зависимости от значения *спина* делятся на **мезоны** (спин нулевой) и **барионы** (спин $1/2$, кроме *омега-гиперона*, у которого спин $3/2$). У каждой из частиц этой группы, кроме *эта-нуль-мезона*, есть античастица. «Зоопарк» элементарных частиц (их общее число вместе с античастицами более 400) расширяется за счет группы адронов. Все адроны (кроме протона) претерпевают распад. *Фундаментальное* свойство элементарных частиц — их *взаимопревращаемость*, причем для всех типов взаимодействий выполняются законы сохранения энергии, импульса, момента импульса и электрических зарядов.

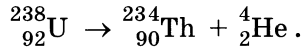
АЛЬФА-РАСПАД — самопроизвольное радиоактивное превращение атомных ядер некоторых элементов, сопровождающееся испусканием α -частиц. Происходит α -распад в соответствии с **правилом смещения**, позволяющим установить, какое ядро возникает в результате распада данного материнского ядра:



где ${}^A_Z X$ — материнское ядро, Y — символ дочернего ядра, ${}^4_2 \text{He}$ — ядро гелия (α -частица). Правило смещения — следствие законов сохранения электрического заряда и со-

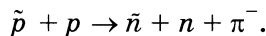
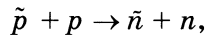
хранения массового числа: *сумма зарядовых (массовых) чисел возникающих ядер и частиц равна зарядовому (массовому) числу исходного ядра.*

α -Распад имеет место для тяжелых ядер ($A > 200$, $Z > 82$). Только небольшая группа α -активных ядер приходится на ядра с A равным 140—160 (редкоземельные элементы). Пример α -распада:

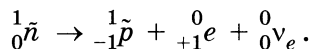


Согласно современным представлениям, α -частицы образуются в момент радиоактивного распада при встрече движущихся внутри ядра двух протонов и двух нейтронов. Измерения показали, что энергетический спектр α -частиц, испускаемых данным радиоактивным элементом, обнаруживает «тонкую структуру», т. е. испускается несколько групп α -частиц, причем в пределах каждой группы их энергии практически постоянны. Дискретный спектр α -частиц свидетельствует о том, что атомные ядра обладают дискретными энергетическими уровнями. Для α -распада характерна сильная зависимость между периодом полураспада и энергией вылетающих частиц.

АНТИНЕЙТРОН (открыт в 1956 г.) — а н т и ч а с т и ц а по отношению к н е й т р о н у, обозначается \bar{n} . Антинейтроны возникли в результате перезарядки антипротонов (\bar{p}) при их движении через вещество. Реакция перезарядки \bar{p} состоит в обмене зарядов между нуклоном и антинуклоном и может происходить по схемам:



Антинейтрон отличается от нейтрона знаком собственного магнитного момента. Свободный антинейтрон, если он не испытывает а н н и г и л я ц и и, в конце концов претерпевает распад по схеме:



АНТИПРОТОН — стабильная частица, а н т и ч а с т и ц а по отношению к п р о т о н у, обозначается \bar{p} . Обнаружен экспериментально в 1955 г. при рассеянии протонов на нуклонах ядер мишени (мишенью служила медь), в результате которого рождалась пара протон—антипротон. Антипротон отличается от протона знаками электрического заряда и собственного магнитного момента. Антипротон может а н н и г и л и р о в а т ь не только с протонами, но и н е й т р о н о м.

АНТИЧАСТИЦЫ. Согласно **принципу зарядового сопряжения** для каждой элементарной частицы должна существовать **античастица**. Эксперименты показывают, что за немногим исключением (например, фотона и эта-нуль-мезона), действительно каждой элементарной частице соответствует античастица. Первая открытая античастица (предсказана теоретически Дираком (1928) и экспериментально обнаружена в космическом излучении (1932) Андерсоном) — **п о з и т р о н** (античастица электрону).

Из общих положений квантовой теории следует, что частицы и античастицы должны иметь одинаковые массы, одинаковые времена жизни в вакууме, одинаковые по модулю, но противоположные по знаку электрические заряды (и магнитные моменты), одинаковые спины, а также одинаковые остальные квантовые числа, приписываемые элементарным частицам для описания закономерностей их взаимодействия. До 1956 г. считалось, что имеется полная симметрия между частицами и античастицами, т. е. если какой-то процесс идет между частицами, то должен существовать точно такой же (с теми же характеристиками) процесс между античастицами. Однако в 1956 г. доказано, что подобная симметрия характерна только для сильного и электромагнитного взаимодействий и нарушается для слабого.

При столкновении частицы и античастицы происходит их а н н и г и л я ц и я.

АТОМНОЕ ЯДРО, ХАРАКТЕРИСТИКИ. Атомное ядро любого химического элемента состоит из элементарных частиц — п р о т о н о в и н е й т р о н о в. Протоны и нейтроны называ-

ются **нуклонами**. Общее число нуклонов в атомном ядре называется **массовым числом A** .

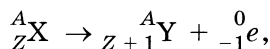
Атомное ядро характеризуется зарядом Ze , где Z — **зарядовое число** ядра, равное числу протонов в ядре и совпадающее с порядковым номером химического элемента в периодической системе элементов Менделеева. Известные в настоящее время 109 элементов таблицы Менделеева имеют зарядовые числа ядер от $Z = 1$ до $Z = 109$.

Ядро обозначается тем же символом, что и нейтральный атом: A_ZX , где X — символ химического элемента, Z — атомный номер (число протонов в ядре), A — массовое число (число нуклонов в ядре).

Так как атом нейтрален, то заряд ядра определяет и число электронов в атоме. От числа электронов зависит их распределение по состояниям в атоме, с которым, в свою очередь, связаны химические свойства атома. Следовательно, заряд ядра определяет специфику данного химического элемента, т. е. определяет число электронов в атоме, конфигурацию их электронных оболочек, величину и характер внутриатомного электрического поля.

Ядра с одинаковыми Z , но разными A (т. е. с разными числами нейтронов $N = A - Z$) называются **изотопами**, а ядра с одинаковыми A , но разными Z — **изобарами**. Например, водород ($Z = 1$) имеет три изотопа: ${}^1_1\text{H}$ — протий ($Z = 1, N = 0$), ${}^2_1\text{H}$ — дейтерий ($Z = 1, N = 1$), ${}^3_1\text{H}$ — тритий ($Z = 1, N = 2$); олово — десять, и т. д.

БЕТА-РАСПАД — самопроизвольное радиоактивное превращение атомных ядер некоторых элементов, сопровождающееся испусканием электрона и антинейтрино. Происходит **β -распад** в соответствии с **правилом смещения**, позволяющим установить, какое ядро возникает в результате распада данного материнского ядра:



где A_ZX — материнское ядро, Y — символ дочернего ядра, ${}^0_{-1}e$ — символическое обозначение электрона (заряд его равен -1 , а массовое число — нулю). Здесь, как и в случае альфа-распада, выполняются законы сохранения электрического заряда и массового числа.

При объяснении β -распада возник ряд трудностей.

1) Откуда берется электрон, ведь в ядре, согласно протонно-нейтронной модели атома, электронов нет?

2) Из опытов следует, что электроны имеют всевозможные энергии (рис. 139), вплоть до значения E_{\max} , т. е. спектр электронов непрерывный. Каким же образом β -активные ядра, обладающие до и после распада вполне определенными энергиями, могут выбрасывать электроны со всевозможными энергиями?

3) При β -распаде число нуклонов в ядре не изменяется (так как остается постоянным массовое число A), поэтому не должен меняться и *спин ядра*, который равен целому числу \hbar при четном A и полуцелому \hbar при нечетном A . Однако выброс электрона, имеющего спин $\hbar/2$, должен изменить спин ядра на величину $\hbar/2$.

Последние два затруднения привели Паули (1931) к гипотезе, что при β -распаде вместе с электроном испускается *нейтрино*. Впоследствии оказалось, что при β -распаде испускается не нейтрино, а **антинейтрино** (античастица по отношению к нейтрино; обозначается ${}^0_0\bar{\nu}_e$).

Введение антинейтрино позволило объяснить кажущееся несохранение спина. Кроме того, если вместе с электроном вылетает антинейтрино, то сплошной спектр β -частиц обусловлен распределением энергии между электронами и антинейтрино, причем сумма энергий обеих частиц равна E_{\max} . В одних актах распада большую энергию получает антинейтрино, в других — электрон; в граничной точке кривой на рис. 139, где энергия электрона равна

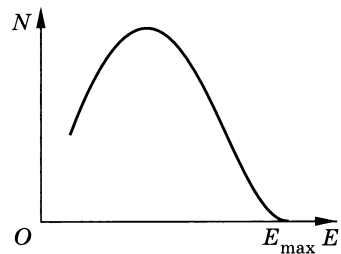
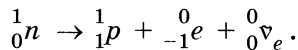


Рис. 139

E_{\max} , вся энергия распада уносится электроном, а энергия антинейтрино равна нулю.

Наконец, вопрос о происхождении электронов при β -распаде. Поскольку электрон не вылетает из ядра и не вырывается из оболочки атома, было сделано предположение, что *β -электрон рождается в результате процессов, происходящих внутри ядра*. Так как при β -распаде число нуклонов в ядре не изменяется, а Z увеличивается на единицу, то единственной возможностью одновременного осуществления этих условий является превращение одного из нейтронов β -активного ядра в протон с одновременным образованием электрона и вылетом антинейтрино:



В этом процессе выполняются законы сохранения электрических зарядов, импульса и массовых чисел. Кроме того, данное превращение энергетически возможно, так как масса нейтрона превышает массу атома водорода, т. е. протона и электрона вместе взятых. Данной разности в массах соответствует энергия, равная 0,782 МэВ. За счет этой энергии может происходить самопроизвольное превращение нейтрона в протон; энергия распределяется между электроном и антинейтрино.

БОРА ПОСТУЛАТЫ — первая попытка построить качественно новую — *квантовую* — теорию атома (1913), где Бор попытался связать эмпирические закономерности линейчатых спектров атома водорода, ядерную модель атома Резерфорда и квантовый характер излучения и поглощения.

Первый постулат Бора: в атоме существуют стационарные (не изменяющиеся со временем) состояния, характеризующиеся определенными дискретными значениями энергии, в которых он не излучает энергию.

Стационарным состояниям атома соответствуют стационарные орбиты, по которым движутся электроны. Движение электронов по стационарным орбитам не сопровождается излучением электромагнитных волн. Различные возможные ста-

ционарные состояния атома, образованного из атомного ядра и электрона, определяются по Бору соотношением:

$$m_e v_n r_n = n\hbar \quad (n = 1, 2, 3\dots),$$

где m_e — масса электрона, v_n — его скорость по n -й орбите радиуса r_n , $\hbar = h/(2\pi) = 1,05 \cdot 10^{-34}$ — **постоянная Планка**.

Второй постулат Бора: при переходе электрона из одного стационарного состояния в другое излучается (поглощается) фотон с энергией, равной разности энергий соответствующих стационарных состояний:

$$h\nu = E_n - E_m,$$

где E_n и E_m — соответственно энергии стационарных состояний атома до и после излучения (поглощения).

При $E_m < E_n$ происходит излучение фотона (переход атома из состояния с большей энергией в состояние с меньшей энергией, т. е. переход электрона с более удаленной от ядра орбиты на близлежащую), при $E_m > E_n$ — его поглощение (переход атома в состояние с большей энергией, т. е. переход электрона на более удаленную от ядра орбиту). Набор возможных дискретных частот $\nu = (E_n - E_m)/h$ квантовых переходов и определяет *линейчатый спектр* атома. Дискретность значения энергии атомов доказана опытами Франка и Герца.

ВИЛЬСОНА КАМЕРА (1912) — старейший и на протяжении многих десятилетий (вплоть до 50—60-х гг.) единственный тип трекового детектора. Выполняется обычно в виде стеклянного цилиндра с плотно прилегающим поршнем. Цилиндр наполняется нейтральным газом (обычно гелием или аргоном), насыщенным парами воды или спирта. При резком, т. е. адиабатическом, расширении газа пар становится пересыщенным и на траекториях частиц, пролетевших через камеру, образуются треки из тумана. Образовавшиеся треки для воспроизводства их пространственного расположения фотографируются стереоскопически, т. е. под разными углами. По характеру и геометрии треков можно судить о типе прошедших через камеру частиц (например, α -частица оставляет сплошной жирный

след, β -частица — тонкий), энергии частиц (по величине пробега), плотности ионизации (по количеству капель на единицу длины трека), количестве участвующих в реакции частиц.

Д. В. Скобельцын значительно расширил возможности камеры Вильсона, поместив ее в сильное магнитное поле (1927). По искривлению траектории заряженных частиц в магнитном поле, т. е. по кривизне трека, можно судить о знаке заряда, а если известен тип частицы (ее заряд и масса), то по радиусу кривизны трека можно определить энергию и массу частицы даже в том случае, если весь трек в камере не уместается (для реакций при высоких энергиях вплоть до сотен мегаэлектрон-вольт).

ГАЗОРАЗРЯДНЫЙ СЧЕТЧИК. В газоразрядных счетчиках основную роль играет вторичная ионизация, обусловленная столкновениями первичных ионов с атомами и молекулами газа и стенок. Они бывают двух типов: 1) **пропорциональные счетчики** (работают в области вольт-амперной характеристики, соответствующей несамостоятельному газовому разряду, т. е. выходной импульс пропорционален первичной ионизации (энергии влетевшей в счетчик частицы), а потому они регистрируют не только частицы, но и оценивают ее энергию); 2) **счетчики Гейгера—Мюллера** (работают в области вольт-амперной характеристики, соответствующей самостоятельному газовому разряду, когда выходной импульс не зависит от первичной ионизации, а потому они регистрируют частицу без измерения ее энергии).

ДАВЛЕНИЕ СВЕТА. Поскольку фотоны обладают импульсом, то свет, падающий на тело, должен оказывать на него давление. Согласно *квантовой теории* давление света на поверхность тела обусловлено тем, что каждый фотон при соударении с поверхностью передает ей свой импульс.

Пусть поток монохроматического излучения (частота ν) падает перпендикулярно поверхности. Если в единицу времени на единицу площади поверхности тела падает N фотонов, то при коэффициенте отражения света ρ от поверхности тела отразится ρN фотонов, а $(1 - \rho) N$ — поглотится. Каждый поглощенный фотон передает поверхности импульс $p_\gamma = h\nu/c$, а каж-

дый отраженный — $2p_\gamma = 2h\nu/c$ (при отражении импульс фотона изменяется на $-p_\gamma$). Давление света на поверхность равно импульсу, который передают поверхности в 1 с N фотонов:

$$p = \frac{2h\nu}{c} \rho N + \frac{h\nu}{c} (1 - \rho) N = (1 + \rho) \frac{h\nu}{c} N.$$

$Nh\nu = E_e$ есть энергия всех фотонов, падающих на единицу поверхности в единицу времени, а $E_e/c = w$ — объемная плотность энергии излучения. Поэтому давление, производимое светом при нормальном падении на поверхность,

$$p = \frac{E_e}{c} (1 + \rho) = w(1 + \rho).$$

Эта формула, выведенная на основе квантовых представлений, получается также из волновой теории. Рассмотрим качественно (без вывода формулы) этот результат. Под действием электрического поля \vec{E} электромагнитной волны электроны в металле будут двигаться со скоростью \vec{v} в направлении, противоположном \vec{E} . Магнитное поле \vec{B} электромагнитной волны действует на движущиеся электроны с силой Лоренца (по правилу левой руки) в направлении, перпендикулярном поверхности металла (рис. 140). Следовательно, электромагнитная волна оказывает на поверхность металла давление.

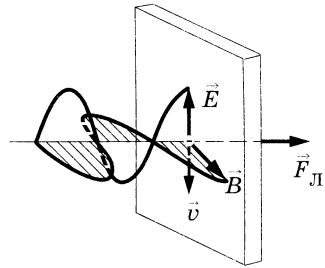


Рис. 140

Существование светового давления на твердые тела и газы подтверждено экспериментально (опыты Лебедева).

ДИФФУЗИОННАЯ КАМЕРА — это разновидность камеры Вильсона. В ней рабочим веществом также является пересыщенный пар, но состояние пересыщения создается диффузией паров спирта от нагретой (до 10°C) крышки ко дну, охлаждаемому (до -60°C) твердой углекислотой. Вблизи дна возникает слой пересыщенного пара толщиной примерно 5 см, в котором проходящие заряженные частицы создают треки. В отличие от вильсоновской диффузионная камера работает непрерывно.

Кроме того, из-за отсутствия поршня в ней могут создаваться давления до 4 МПа, что значительно увеличивает ее эффективный объем.

ЗАКОН РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА. Радиоактивный распад — естественное радиоактивное превращение ядер, происходящее самопроизвольно. Атомное ядро, испытывающее радиоактивный распад, называется **материнским**, возникающее — **дочерним**.

Закон радиоактивного распада:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (1)$$

где N_0 — начальное число *нераспавшихся* ядер (в момент времени $t = 0$), N — число *нераспавшихся* ядер в момент времени t , λ — постоянная радиоактивного распада, e — основание натурального логарифма. Согласно закону радиоактивного распада число нераспавшихся ядер убывает со временем по *экспоненциальному закону* (рис. 141). Число ядер, распавшихся за время t ,

$$\Delta N = N_0 - N = N_0(1 - e^{-\lambda t}).$$

Закон радиоактивного распада — *статистический закон*, т. е. справедлив при наличии огромного числа радиоактивных ядер.

Период полураспада $T_{1/2}$ — время, за которое исходное число радиоактивных ядер *в среднем* уменьшается вдвое. Тогда, согласно формуле (1),

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}},$$

откуда

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}.$$

Периоды полураспада для естественно-радиоактивных элементов колеблются от десятиmillionных долей секунды до многих миллиардов лет.

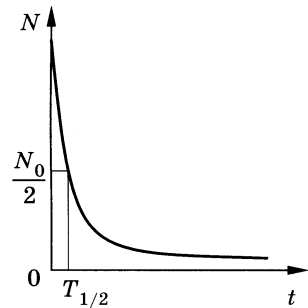


Рис. 141

ИЗЛУЧЕНИЕ, СПОНТАННОЕ И ВЫНУЖДЕННОЕ. Атомы могут находиться лишь в состояниях с дискретными значениями энергии E_1, E_2, E_3, \dots . Если атом находится в основном состоянии 1 , то под действием внешнего излучения может осуществиться вынужденный переход в возбужденное состояние 2 (рис. 142, а), приводящий к поглощению излучения.

Атом, находясь в возбужденном состоянии 2 , может через некоторый промежуток времени спонтанно, без каких-либо внешних воздействий, перейти в основное состояние 1 , отдавая избыточную энергию в виде электромагнитного излучения (испуская фотон с энергией $h\nu = E_2 - E_1$). Процесс испускания фотона возбужденным атомом (возбужденной микросистемой) без каких-либо внешних воздействий называется **спонтанным излучением** (рис. 142, б).

Эйнштейн постулировал, что помимо поглощения и спонтанного излучения должен существовать третий, качественно иной тип взаимодействия. Если на атом, находящийся в возбужденном состоянии 2 , действует внешнее излучение с частотой, удовлетворяющей условию $h\nu = E_2 - E_1$, то возникает **вынужденный (индуцированный) переход** в основное состояние 1 с излучением фотона той же энергии $h\nu = E_2 - E_1$ (рис. 142, в). При подобном переходе происходит излучение атомом фотона *дополнительно* к тому фотону, под действием которого про-

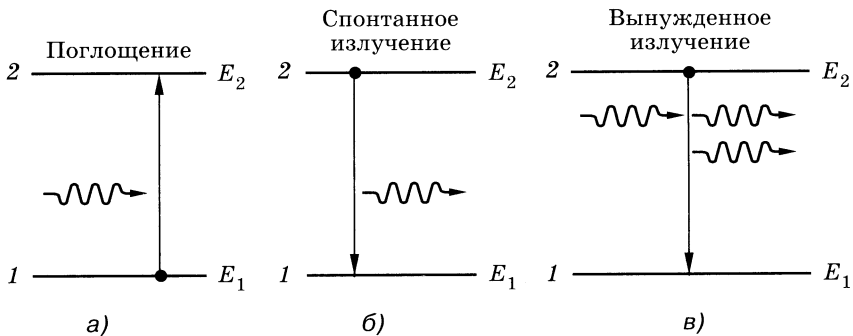


Рис. 142

изошел переход. Возникающее в результате таких переходов излучение называется **вынужденным (индуцированным) излучением**. Таким образом, в процесс вынужденного излучения вовлечены два фотона: первичный фотон, вызывающий испускание излучения возбужденным атомом, и вторичный фотон, испущенный атомом. Вынужденное излучение (вторичные фотоны) *тождественно* вынуждающему излучению (первичным фотонам): оно имеет такую же частоту, фазу, поляризацию и направление распространения, как и вынуждающее излучение. Следовательно, вынужденное излучение *строго когерентно* с вынуждающим излучением, т. е. испущенный фотон неотличим от фотона, падающего на атом.

Испущенные фотоны, двигаясь в одном направлении и встречая другие возбужденные атомы, стимулируют дальнейшие индуцированные переходы, и число фотонов растет лавинообразно. Однако наряду с вынужденным излучением возможен и конкурирующий процесс — поглощение. В системе атомов, находящейся в термодинамическом равновесии, поглощение падающего излучения будет преобладать над вынужденным излучением, т. е. падающее излучение при прохождении через вещество будет ослабляться.

Чтобы среда усиливала падающее на нее излучение, необходимо создать *неравновесное состояние системы*, при котором число атомов в возбужденных состояниях было бы больше, чем их число в основном состоянии. Такие состояния называются **состояниями с инверсией населенностей**. Процесс создания неравновесного состояния вещества (перевод системы в состояние с инверсией населенностей) называется **накачкой**. Накачку можно осуществить оптическими, электрическими и другими способами.

В средах с инверсными состояниями вынужденное излучение может превысить поглощение, вследствие чего падающий пучок света при прохождении через эти среды будет усиливаться (эти среды называются **активными**).

ИОНИЗАЦИОННАЯ КАМЕРА — это детектор частиц, действие которого основано на способности заряженных частиц вызывать ионизацию газа. Ионизационная камера представляет собой

заполненный газом электрический конденсатор, к электродам которого подается постоянное напряжение. Регистрируемая частица, попадая в пространство между электродами, ионизует газ. Напряжение подбирается так, чтобы все образовавшиеся ионы, с одной стороны, доходили до электродов, не успев рекомбинировать, а с другой — не разгонялись настолько сильно, чтобы производить вторичную ионизацию. Следовательно, в ионизационной камере на ее электродах непосредственно собираются ионы, возникшие под действием заряженных частиц. Ионизационные камеры бывают двух типов: *интегрирующие* (в них измеряется суммарный ионизационный ток) и *импульсные*, являющиеся, по существу, счетчиками (в них регистрируется прохождение одиночной частицы и измеряется ее энергия, правда, с довольно низкой точностью, обусловленной малостью выходного сигнала).

КВАРКИ — гипотетические «настоящие элементарные частицы», из которых могут быть «построены» все адроны. Сначала, ко времени «открытия» кварков (1964), все известные *барионы* можно было построить из трех кварков (а тогда было известно именно три кварка), а *мезоны* — из одного кварка и одного **антикварка** (античастицы для кварка). Кваркам приписывался дробный электрический заряд ($\frac{2}{3}$ или $\frac{1}{3}$ элементарного заряда!), так как только таким образом можно было «составить» адроны. Это — самое удивительное (почти невероятное) свойство кварков, поскольку еще никто в экспериментах не обнаружил частицы с дробным значением элементарного электрического заряда. Трех кварков (и соответственно антикварков) не хватало для объяснения свойств адронов, в том числе и вновь открытых и предсказанных, а потому предположили существование еще трех кварков (и соответственно антикварков).

В настоящее время признана точка зрения, что между лептонами и кварками существует симметрия: число лептонов должно быть равно числу кварков. Является ли схема из шести лептонов и шести кварков окончательной или же число лептонов (кварков) будет расти, покажут дальнейшие исследования.

ЛЕПТОНЫ — группа из шести элементарных частиц (см. также *Элементарные частицы, классификация*), не участвующих в сильном взаимодействии, но способные к слабому и электромагнитному взаимодействию. Термин «лептон» определяет частицу с малой массой, что и подтверждалось (масса электрона и мюона меньше массы всех остальных частиц) до открытия тау-лептона ($m = 3492m_e$). Лептоны подразделяются на три семейства: электрон и электронное нейтрино, мюон и мюонное нейтрино, тау-лептон и таонное нейтрино. У всех лептонов есть античастицы. Спин лептонов равен $1/2$ (в единицах \hbar).

ЛИНЕЙЧАТЫЙ СПЕКТР АТОМА ВОДОРОДА. Спектры излучения атомов являются линейчатыми. Каждому элементу соответствует свой, характерный только для него спектр, вид которого не зависит от способа возбуждения атома.

Спектр излучения атома водорода — простейшего, а потому наиболее изученного, атома определяется подобранной эмпирически **формулой Бальмера**, описывающей все известные спектральные линии атома водорода:

$$\nu = R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$

где ν — частота спектральных линий в спектре атома водорода; $R = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$ — **постоянная Ридберга**; m определяет серию ($m = 1, 2, 3, 4, 5, 6$, например при $m = 1$ — **серия Лаймана** (в ультрафиолетовой области спектра), $m = 2$ — **серия Бальмера** (в видимой области спектра), $m = 3$ — **серия Пашена** (в инфракрасной области спектра) и т. д.); n определяет отдельные линии данной серии ($n = m + 1, m + 2, \dots$). С увеличением n линии серии сближаются; значение $n = \infty$ определяет границу серии. Например, серия Бальмера описывается формулой

$$\nu = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (n = 3, 4, 5, \dots).$$

Все сериальные формулы подобраны эмпирически и долгое время не имели теоретического обоснования, хотя и были подтверждены экспериментально с очень большой точностью. Вид сериальных формул, удивительная повторяемость в них целых чисел, универсальность постоянной Ридберга свидетельствуют о глубоком физическом смысле найденных закономерностей, вскрыть который в рамках классической физики оказалось *невозможным*.

МЕТОДЫ РЕГИСТРАЦИИ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ И ЧАСТИЦ

Практически все методы наблюдения и регистрации радиоактивных излучений (α , β , γ) и частиц основаны на их способности производить ионизацию и возбуждение атомов среды. Заряженные частицы вызывают эти процессы непосредственно, поэтому о них можно судить по результату ионизирующего воздействия на среду. А γ -кванты и нейтроны обнаруживаются по ионизации, вызываемой возникающими в результате их взаимодействия с электронами и ядрами атомов среды быстрыми заряженными частицами. Вторичные эффекты, сопровождающие рассмотренные процессы, такие, как вспышка света, электрический ток, потемнение фотопластинки, позволяют регистрировать пролетающие частицы, считать их, отличать друг от друга и измерять их энергию.

Приборы, применяемые для регистрации радиоактивных излучений и частиц, делятся на две группы:

1) приборы, позволяющие регистрировать прохождение частицы через определенный участок пространства и в некоторых случаях определять ее характеристики, например энергию (сцинтилляционный счетчик, газоразрядный счетчик, ионизационная камера, полупроводниковый счетчик);

2) приборы, позволяющие наблюдать, например фотографировать, следы (треки) частиц в веществе (камера Вильсона, диффузионная камера, пузырьковая камера, ядерные фотоэмульсии).

МОДЕЛИ АТОМА. Модель атома Томсона — первая попытка (1903) создания модели атома. Согласно этой модели атом представляет собой непрерывно заряженный положительным

зарядом шар радиусом порядка 10^{-10} м, внутри которого около своих положений равновесия колеблются электроны; суммарный отрицательный заряд электронов равен положительному заряду шара, поэтому атом в целом нейтрален. Через несколько лет было доказано, что представление о непрерывно распределенном внутри атома положительном заряде ошибочно.

Ядерная модель атома. В ее становлении большое значение сыграли опыты Резерфорда по рассеянию α -частиц в веществе. **α -частицы** возникают при радиоактивных превращениях; они являются положительно заряженными частицами с зарядом $2e$ и массой, примерно в 7300 раз большей массы электрона. Пучки α -частиц обладают высокой монохроматичностью (для данного превращения имеют практически одну и ту же скорость (порядка 10^7 м/с)).

Резерфорд, исследуя прохождение α -частиц в веществе (через золотую фольгу толщиной примерно 1 мкм), показал, что основная их часть испытывает незначительные отклонения, но некоторые α -частицы (примерно одна из 20 000) резко отклоняются от первоначального направления (углы отклонения достигали даже 180°). Так как электроны не могут существенно изменить движение столь тяжелых и быстрых частиц, как α -частицы, то Резерфордом был сделан вывод, что значительное отклонение α -частиц обусловлено их взаимодействием с положительным зарядом большой массы. Однако значительное отклонение испытывают лишь немногие α -частицы; следовательно, лишь некоторые из них проходят вблизи данного положительного заряда. Это, в свою очередь, означает, что положительный заряд атома сосредоточен в объеме, очень малом по сравнению с объемом атома.

На основании этих опытов Резерфорд (1911) предложил **ядерную (планетарную) модель атома**. Согласно этой модели, вокруг положительного ядра, имеющего заряд Ze (Z — порядковый номер элемента в системе Менделеева, e — элементарный заряд), размер 10^{-15} — 10^{-14} м и массу, практически равную массе атома, в области с линейными размерами порядка 10^{-10} м по замкнутым орбитам движутся электроны, образуя электронную оболочку атома. Так как атомы нейтральны, то

заряд ядра равен суммарному заряду электронов, т. е. вокруг ядра должно вращаться Z электронов.

Предположив, что электрон движется вокруг ядра по круговой орбите радиуса r , на основании второго закона Ньютона получим:

$$\frac{Zee}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{m_e v^2}{r}, \quad (1)$$

где в левой части выражения записана кулоновская сила взаимодействия между ядром и электроном (m_e и v — масса и скорость электрона по орбите радиуса r).

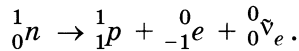
Модель атома Резерфорда не смогла объяснить экспериментально полученный линейчатый спектр излучения атомов (уравнению (1) отвечает бесчисленное множество значений радиуса и соответствующих ему значений скорости (следовательно, и энергии), а поэтому может испускаться *любая, а не вполне определенная порция энергии*). Кроме того, согласно классической электродинамике, ускоренно движущиеся электроны должны излучать электромагнитные волны и вследствие этого непрерывно терять энергию. В результате электроны будут приближаться к ядру и в конце концов упадут на него. Таким образом, атом Резерфорда оказывается неустойчивой системой, что опять-таки противоречит действительности.

Попытки построить модель атома в рамках классической физики не привели к успеху: модель Томсона была опровергнута опытами Резерфорда, ядерная же модель оказалась неустойчивой электродинамической системой и противоречила опытным данным. Преодоление возникших трудностей потребовало создания качественно новой — *квантовой* — теории атома.

НЕЙТРИНО — нейтральная частица, имеет нулевой заряд, спин $1/2$ (в единицах \hbar) и нулевую (а скорее $< 10^{-4} m_e$) массу покоя; обозначается $\overset{0}{\nu}$. Принадлежит к числу лептонов, участвует (кроме гравитационного) только в слабом взаимодействии. Ионизирующая способность нейтрино столь мала, что один акт ионизации приходится на 500 км пути.

Проникающая способность огромна (пробег нейтрино с энергией 1 МэВ в свинце составляет $\sim 10^{18}$ м). Известны **три типа нейтрино**: электронное (${}^0_0\nu_e$), мюонное (${}^0_0\nu_\mu$) и таонное (${}^0_0\nu_\tau$) (см. **Лептоны**).

НЕЙТРОН — электрически нейтральная элементарная частица, обозначается 1_0n . Масса нейтрона $m_n = 1,6749 \cdot 10^{-27}$ кг $\approx \approx 1839 m_e$ (m_e — масса электрона) и *спин* 1/2 (в единицах \hbar). Относится к *адронам* и входит в группу *барионов*. Свободный нейтрон за счет слабого взаимодействия распадается на протон, электрон и электронное антинейтрино:



Нейтрон устойчив только в составе стабильных атомных ядер.

ОПТИЧЕСКИЕ КВАНТОВЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ (ЛАЗЕРЫ) — устройства, генерирующие монохроматические электромагнитные волны оптического диапазона вследствие вынужденного излучения.

Важнейшими из существующих типов лазеров являются **твердотельные, газовые, полупроводниковые и жидкостные** (в основу такого деления положен тип *активной среды*). Более точная классификация учитывает также и *методы накачки* — оптические, тепловые, химические и др. Кроме того, необходимо принимать во внимание и *режим генерации* — непрерывный или импульсный.

Лазер обязательно имеет три основных компонента: 1) **активную среду**, в которой создаются состояния с инверсией населенностей; 2) **систему накачки** (устройство для создания инверсии в активной среде); 3) **оптический резонатор** (устройство, выделяющее в пространство избирательное направление пучка фотонов и формирующее выходящий световой пучок).

Первым твердотельным лазером (1960; США), работающим в видимой области спектра (длина волны излучения 0,6943 мкм), был рубиновый лазер (Т. Мейман). В нем инверсная населенность уровней осуществляется по трехуровневой схеме, пред-

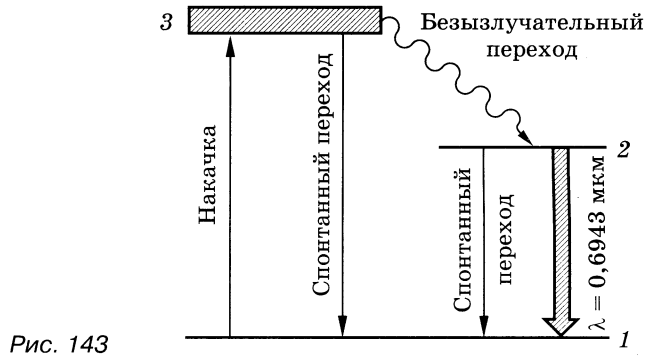


Рис. 143

ложенной Н. Г. Басовым и А. М. Прохоровым. Кристалл рубина представляет собой оксид алюминия Al_2O_3 , в кристаллической решетке которого некоторые из атомов Al замещены трехвалентными ионами Cr^{3+} (0,03% ионов хрома, например, для розового рубина). Для оптической накачки используется импульсная газоразрядная лампа. При интенсивном облучении рубина светом мощной импульсной лампы атомы хрома переходят с нижнего уровня 1 на уровни широкой полосы 3 (рис. 143). Так как время жизни атомов хрома в возбужденных состояниях $\sim 10^{-7}$ с, то осуществляются либо спонтанные переходы $3 \rightarrow 1$ (они незначительны), либо наиболее вероятные безызлучательные переходы на уровень 2 (он называется метастабильным) с передачей избытка энергии решетке кристалла рубина. Переход $2 \rightarrow 1$ запрещен правилами отбора, поэтому длительность возбужденного состояния 2 атомов хрома порядка 10^{-3} с, т. е. примерно на четыре порядка больше, чем для состояния 3. Это приводит к «накоплению» атомов хрома на уровне 2. При достаточной мощности накачки их концентрация на уровне 2 будет гораздо больше, чем на уровне 1, т. е. возникает среда с инверсной населенностью уровня 2.

Каждый фотон, случайно родившийся при спонтанных переходах, в принципе может инициировать (порождать) в активной среде множество вынужденных переходов $2 \rightarrow 1$, в результате чего появляется лавина вторичных фотонов,

являющихся копиями первичных. Таким образом и зарождается лазерная генерация. Однако спонтанные переходы носят случайный характер, и спонтанно рождающиеся фотоны испускаются в разных направлениях. Для выделения направления лазерной генерации используется *оптический резонатор*.

Свойства лазерного излучения: 1) *высокая когерентность* (на семь порядков выше, чем у обычных источников света); 2) *строгая монохроматичность* ($\Delta\lambda < 10^{-11}$ м); 3) *большая плотность потока энергии*; 4) *очень малое угловое расхождение в пучке*.

Применение лазеров многообразно: обработка, резание и микросварка твердых материалов; в тончайших операциях (хирургический нож); лазерное разделение изотопов (например, урана); исследование высокотемпературной плазмы и т. д.

ПЛАНКА КВАНТОВАЯ ГИПОТЕЗА. В классической физике считается, что испускание света источником происходит *непрерывно*, и энергия любого тела (или системы) изменяется *непрерывно*, т. е. может принимать любые, сколь угодно близкие значения. Планк (1900) высказал **квантовую гипотезу**, согласно которой *атомы излучают энергию не непрерывно, а отдельными порциями — квантами* (от лат. quantum — количество). Энергия каждой такой порции пропорциональна частоте ν излучения:

$$\mathcal{E} = h\nu,$$

где $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж · с — **постоянная Планка, универсальная физическая постоянная**. Развитие гипотезы Планка привело к созданию квантовой теории света.

Эйнштейн предположил далее, что свет частотой ν не только *испускается* (идея Планка), но и *распространяется* в пространстве и *поглощается* веществом отдельными порциями (квантами). Таким образом, распространение света рассматривается не как непрерывный процесс, а как *поток дискретных световых квантов, движущихся со скоростью c — скоростью распространения света в вакууме*.

Кванты электромагнитного излучения получили название **фотонов**. Энергия и импульс фотонов определяются по формулам:

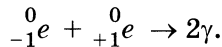
$$\mathcal{E} = h\nu = \frac{hc}{\lambda}; p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}, \quad (1)$$

где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с, λ — длина волны излучения в вакууме.

Из квантового соотношения $\mathcal{E} = h\nu$ и общих принципов теории относительности следует, что масса фотона равна нулю и фотон всегда движется со скоростью c .

Формулы (1) связывают *корпускулярные* характеристики фотона — энергию и импульс с *волновой* характеристикой излучения — частотой (длиной волны). *Свет*, следовательно, *обладает одновременно корпускулярными и волновыми свойствами*, т. е. необходимо говорить о *двойственной корпускулярно-волновой природе света* (о **корпускулярно-волновом дуализме**).

ПОЗИТРОН — античастица по отношению к электрону. Позитрон отличается от электрона знаками электрического заряда и собственного магнитного момента, обозначается ${}^0_{+1}e$. При столкновении позитрона с электроном происходит их **аннигиляция**:



При аннигиляции электронно-позитронная пара превращается в два γ -кванта, причем энергия пары переходит в энергию фотонов. Появление в этом процессе двух γ -квантов следует из закона сохранения импульса и энергии. В процессах аннигиляции выполняются все законы сохранения — импульса, энергии, спина, электрического заряда и т. д.

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ СЧЕТЧИК — это детектор частиц, основным элементом которого является полупроводниковый диод. Время разрешения составляет примерно 10^{-9} с. Полупроводниковые счетчики обладают высокой надежностью, могут работать в магнитных полях. Малая толщина рабочей области (порядка сотни микрометров) полупроводниковых счетчиков не позволяет применять их для регистрации высокоэнергетических частиц.

ПРОТОН — стабильная элементарная частица, ядро атома водорода; обозначается 1_1p . Имеет положительный заряд, равный заряду электрона ($1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл), массу $m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27}$ кг $\approx 1836 m_e$ (m_e — масса электрона) и спин $1/2$ (в единицах \hbar). Относится к *адронам* и входит в группу *барионов*. Участвует (кроме гравитационного) в *сильном, электромагнитном и слабом взаимодействиях*.

ПУЗЫРЬКОВАЯ КАМЕРА. В ней рабочим веществом является перегретая (находящаяся под давлением) прозрачная жидкость (жидкие водород, пропан, ксенон). Запускается камера, так же как и камера Вильсона, резким сбросом давления, переводящим жидкость в неустойчивое перегретое состояние. Пролетающая в это время через камеру заряженная частица вызывает резкое вскипание жидкости, и траектория частицы оказывается обозначенной цепочкой пузырьков пара — образуется трек, который, как и в камере Вильсона, фотографируется. Пузырьковая камера работает циклами. Размеры пузырьков камер примерно такие же, как камеры Вильсона (от десятков сантиметров до 2 м), но их эффективный объем на 2—3 порядка больше, так как жидкости гораздо плотнее газов. Это позволяет использовать пузырьковые камеры для исследования длинных цепей рождений и распадов частицы высоких энергий.

РАБОТА ВЫХОДА — энергия, которую следует затратить для удаления электрона из твердого или жидкого вещества в вакуум. Работа выхода обычно выражается во *внесистемных единицах* — **электрон-вольт (эВ)**: 1 эВ равен работе, совершаемой силами поля при перемещении элементарного электрического заряда (заряда, равного заряду электрона) при прохождении им разности потенциалов в 1 В. $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж.

Работа выхода зависит от химической природы металлов и чистоты их поверхности и колеблется в пределах нескольких электрон-вольт (например, у калия $A = 2,2$ эВ, у платины $A = 6,3$ эВ). Подбрав определенным образом покрытие поверхности, можно значительно уменьшить работу выхода. На-

пример, если нанести на поверхность вольфрама ($A = 4,5$ эВ) слой оксида щелочно-земельного металла (Ca, Sr, Ba), то работа выхода снижается до 2 эВ.

РАДИОАКТИВНОСТЬ — явление самопроизвольного (спонтанного) превращения некоторых атомных ядер в другие ядра с испусканием различных видов радиоактивных излучений. **Радиоактивность** подразделяется на **естественную** (наблюдается у неустойчивых изотопов, существующих в природе) и **искусственную** (наблюдается у изотопов, полученных посредством ядерных реакций). Принципиального различия между этими двумя типами радиоактивности нет, так как законы радиоактивного превращения в обоих случаях одинаковы.

Типы радиоактивного излучения

Альфа-излучение. α -Излучение отклоняется электрическим и магнитным полями, обладает высокой ионизирующей способностью и малой проникающей способностью (например, поглощаются слоем алюминия толщиной примерно 0,05 мм). α -Излучение представляет собой поток ядер гелия; заряд α -частицы равен $+2e$, а масса совпадает с массой ядра изотопа гелия ${}^4_2\text{He}$. По отклонению α -частиц в электрическом и магнитном полях был определен их удельный заряд Q/m_α , значение которого подтвердило правильность представлений об их природе.

Бета-излучение. β -Излучение отклоняется электрическим и магнитным полями; его ионизирующая способность значительно меньше (примерно на два порядка), а проникающая способность гораздо больше, чем у α -частиц; представляет собой поток быстрых электронов.

Гамма-излучение. γ -Излучение не отклоняется электрическим и магнитным полями, обладает относительно слабой ионизирующей способностью и очень большой проникающей способностью; при прохождении через кристаллы наблюдается его дифракция, представляет собой коротковолновое электромагнитное излучение с чрезвычайно малой длиной волны $\lambda < 10^{-10}$ м и вследствие этого — ярко выраженными *корпускулярными свойствами*, т. е. является потоком частиц — γ -квантов (*ф о т о н о в*).

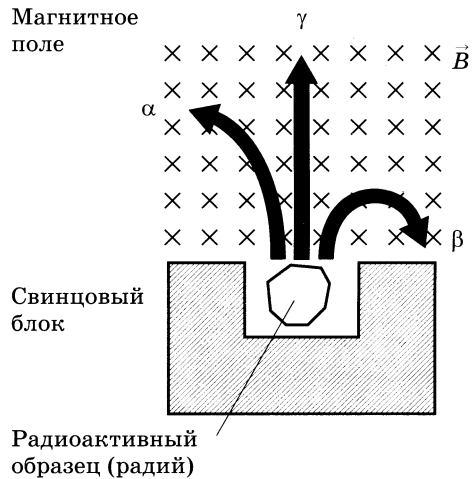


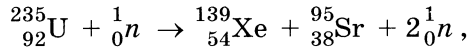
Рис. 144

На рис. 144 схематически представлен опыт по отклонению трех типов радиоактивного излучения в магнитном поле (вектор магнитной индукции \vec{B} направлен за чертеж, что указано на рис. 144 крестиками).

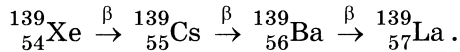
РЕАКЦИЯ ДЕЛЕНИЯ ЯДРА — деление тяжелых ядер под действием нейтронов, а как оказалось впоследствии, и других частиц на несколько более легких ядер (осколков), чаще всего два ядра, близких по массе.

Важная особенность деления ядер: оно сопровождается испусканием двух-трех вторичных нейтронов, называемых **нейтронами деления**. Так как для средних ядер число нейтронов примерно равно числу протонов ($N/Z \approx 1$), а для тяжелых ядер число нейтронов значительно превышает число протонов ($N/Z \approx 1,6$), то образовавшиеся осколки деления перегружены нейтронами, в результате чего они и выделяют нейтроны деления. Однако испускание нейтронов деления не устраняет полностью перегрузку ядер-осколков нейтронами. Это приводит к тому, что осколки оказываются радиоактивными. Они могут претерпеть ряд β -превращений, сопровождаемых испусканием γ -квантов. Так как β -распад сопровождается превращением нейтрона в протон, то после цепочки β -превращений соотношение между нейтронами и протонами в осколке достигнет величины,

соответствующей стабильному изотопу. Например, при делении ядра урана ${}_{92}^{235}\text{U}$ наблюдаются следующие превращения:



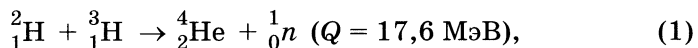
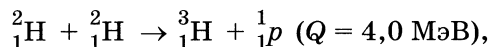
при этом осколок деления ${}_{54}^{139}\text{Xe}$ в результате трех актов β -распада превращается в стабильный изотоп лантана ${}_{57}^{139}\text{La}$:



Расчеты показывают, что деление ядер должно сопровождаться также выделением большого количества энергии. В самом деле, удельная энергия связи (см. рис. 147) для ядер средней массы составляет примерно 8,7 МэВ, в то время как для тяжелых ядер она равна 7,6 МэВ. Следовательно, при делении тяжелого ядра на два осколка должна освобождаться энергия, равная примерно 1,1 МэВ на один нуклон.

Эксперименты подтверждают, что при каждом акте деления действительно выделяется огромная энергия, которая распределяется между осколками (основная доля), нейтронами деления, а также между продуктами последующего распада осколков деления.

РЕАКЦИЯ СИНТЕЗА АТОМНЫХ ЯДЕР — образование из легких ядер более тяжелых. Удельная энергия связи ядер (см. рис. 147) резко увеличивается при переходе от ядер тяжелого водорода (дейтерия ${}_{1}^2\text{H}$ и трития ${}_{1}^3\text{H}$) к литию ${}_{3}^6\text{Li}$ и особенно к гелию ${}_{2}^4\text{He}$, т. е. реакции синтеза легких ядер в более тяжелые должны сопровождаться выделением большого количества энергии, что действительно подтверждается расчетами. В качестве примеров рассмотрим реакции синтеза:



где Q — энергывыделение.

Реакции синтеза атомных ядер обладают той особенностью, что в них энергия, выделяемая на один нуклон, значительно больше, чем в реакциях деления тяжелых ядер. В самом деле, если при делении ядра ${}_{92}^{238}\text{U}$ выделяется энергия примерно 200 МэВ, что составляет на один нуклон примерно 0,84 МэВ, то в реакции (1) эта величина равна $17,6/5$ МэВ $\approx 3,5$ МэВ.

Реакции синтеза легких атомных ядер в более тяжелые, происходящие при сверхвысоких температурах (примерно 10^7 К и выше), называются **термоядерными реакциями**. Термоядерные реакции являются, по-видимому, одним из источников энергии Солнца и звезд. Термоядерные реакции дают наибольший выход энергии на единицу массы «горючего», чем любые другие превращения, в том числе и деление тяжелых ядер. Поэтому заманчива перспектива осуществления термоядерных реакций искусственным путем. Впервые искусственная термоядерная реакция осуществлена в нашей стране (1953), а затем (через полгода) в США в виде взрыва водородной (термоядерной) бомбы, являющегося неуправляемой реакцией.

Особый интерес представляет осуществление управляемой термоядерной реакции, для обеспечения которой необходимо создание и поддержание в ограниченном объеме температуры порядка 10^8 К. Так как при данной температуре термоядерное рабочее вещество представляет собой полностью ионизованную плазму, возникает проблема ее эффективной термоизоляции от стенок рабочего объема. На данном этапе развития считается, что основной путь в этом направлении — это удержание плазмы в ограниченном объеме сильными магнитными полями специальной формы.

СПЕКТР АТОМА ВОДОРОДА ПО БОРУ. Для нахождения возможных энергетических уровней в атоме водорода в формулу для полной энергии $E = -\frac{1}{2} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}$ (см. Энергия атома водорода по Бору) следует подставить значение для радиуса n -й стационарной орбиты:

$$r_n = n^2 \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{m_e e^2}$$

(получается при совместном решении двух уравнений:

$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n^2} = \frac{m_e v_n^2}{r_n} \quad (\text{см. Энергия атома водорода по}$$

Бору) и $m_e v_n r_n = n\hbar$ (см. Бор постулаты):

$$E_n = -\frac{1}{n^2} \frac{m_e e^4}{8h^2 \epsilon_0^2} \quad (n = 1, 2, 3\dots). \quad (1)$$

Энергия электрона в атоме водорода может принимать только дискретные значения, т. е. энергетические состояния атома водорода образуют последовательность энергетических уровней, изменяющихся в зависимости от n . Целое число n , определяющее энергетические уровни атома, называется **главным квантовым числом**. Энергетическое состояние с $n = 1$ является **основным состоянием**; состояния с $n > 1$ являются **возбужденными**. Энергетический уровень, соответствующий основному состоянию атома, называется **основным уровнем**; все остальные уровни являются **возбужденными**.

Придавая n различные целочисленные значения, получим для атома водорода, согласно формуле (1), возможные уровни энергии, схематически представленные на рис. 145. Энергия атома водорода с увеличением n возрастает и энергетические уровни сближаются к границе, соответствующей значению $n = \infty$. Атом водорода обладает минимальной энергией ($E_1 = -13,6$ эВ) при $n = 1$ и максимальной ($E_\infty = 0$) при $n = \infty$ (при удалении электрона из атома). Следовательно, значение $E_\infty = 0$ соответствует **ионизации атома** (отрыву от него электрона).

Подставляя в обобщенную формулу Бальмера $m = 1$ и $n = 2, 3, 4\dots$, получаем группу линий, образующих серию Лаймана, соответствующих переходам электронов с возбужденных уровней ($n = 2, 3, 4\dots$) на

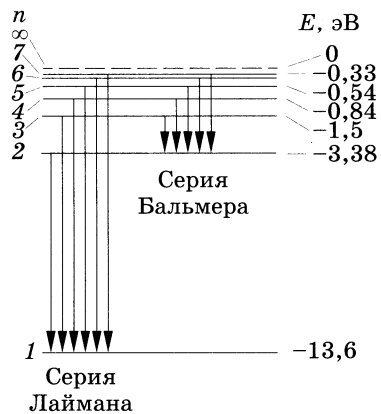


Рис. 145

основной ($m = 1$). Аналогично при подстановке $m = 2, 3, 4, 5, 6$ и соответствующих им значений n получим серию Бальмера, Пашена, Брэггетта, Пфунда.

СПИН — собственный момент импульса элементарной частицы или систем, образованных из этих частиц (например, атомного ядра). Спин измеряется в единицах постоянной Планка \hbar , он является целым или полуцелым: лептоны и барионы имеют спин $\frac{1}{2}$, мезоны — 0, фотоны — 1 (в единицах \hbar). Спин имеет *квантовую природу*, он присущ элементарным частицам в такой же мере, как, например, электрический заряд или другие квантовые характеристики, приписываемые элементарным частицам.

СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ СЧЕТЧИК — детектор ядерных частиц, основными элементами которого являются сцинтиллятор (кристаллофосфор) и **фотоэлектронный умножитель**, позволяющий преобразовывать слабые световые вспышки в электрические импульсы, регистрируемые электронной аппаратурой. Обычно в качестве сцинтилляторов используют кристаллы некоторых неорганических (ZnS — для α -частиц; NaI-Tl, CsI-Tl — для β -частиц и γ -квантов) или органических (антрацен, пластмассы — для γ -квантов) веществ. Наблюдение **сцинтилляций** — вспышек света при попадании быстрых частиц на флуоресцирующий экран — первый метод, позволивший на заре ядерной физики (1903) визуально регистрировать α -частицы.

ФОТОН — элементарная частица, квант электромагнитного излучения. Электрический заряд и масса фотона равны нулю; во всех системах отсчета движется со скоростью распространения света в вакууме ($c = 3 \cdot 10^9$ м/с), спин равен 1 (в единицах \hbar), относится к группе фотонов, участвует в электромагнитном и гравитационном взаимодействиях (см. также Планка квантовая гипотеза).

ФОТОЭФФЕКТ, ЗАКОНЫ. **Фотоэффект** — испускание электронов веществом под действием электромагнитного излучения.

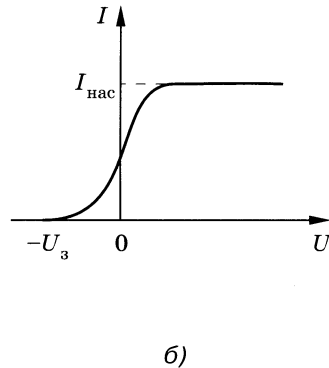
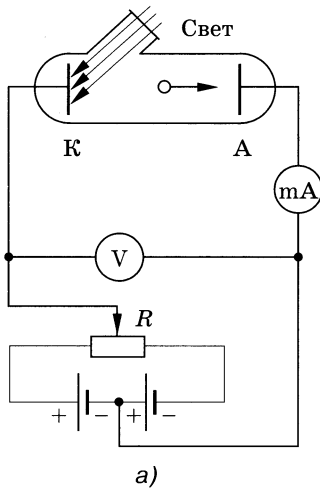


Рис. 146

Первые фундаментальные исследования фотоэффекта выполнены А. Г. Столетовым. Принципиальная схема для исследования фотоэффекта приведена на рис. 146, а. Два электрода (катод К из исследуемого металла и анод А — в схеме Столетова применялась металлическая сетка) в вакуумной трубке подключены к батарее так, что с помощью потенциометра R можно изменять не только значение, но и знак подаваемого на них напряжения. Ток, возникающий при освещении катода монохроматическим светом (через кварцевое окошко), измеряется включенным в цепь миллиамперметром. Облучая катод светом различных длин волн, Столетов установил следующие закономерности: 1) наиболее эффективное действие оказывает ультрафиолетовое излучение; 2) под действием света вещество теряет только отрицательные заряды; 3) сила тока, возникающего под действием света, прямо пропорциональна его интенсивности.

Вольт-амперная характеристика фотоэффекта — зависимость фототока I , образуемого потоком электронов, испускаемых катодом под действием света, от напряжения U между электродами (рис. 146, б). По мере увеличения напряжения U фототок постепенно возрастает, т. е. все большее число фотоэлектронов достигает анода. Пологий характер кривой пока-

зывает, что электроны вылетают из катода с различными скоростями. Максимальное значение тока $I_{\text{нас}}$ — **фототок насыщения** — определяется таким значением U , при котором все электроны, испускаемые катодом, достигают анода:

$$I_{\text{нас}} = en,$$

где n — число электронов, испускаемых катодом в 1 с.

Из вольт-амперной характеристики следует, что при $U = 0$ фототок не исчезает. Следовательно, электроны, выбитые светом из катода, обладают некоторой начальной скоростью v , а значит, и отличной от нуля кинетической энергией и могут достигнуть анода без внешнего поля. Для того чтобы фототок стал равным нулю, необходимо приложить **задерживающее напряжение** U_3 . При $U = U_3$ ни один из электронов, даже обладающий при вылете из катода максимальной скоростью v_{max} , не может преодолеть задерживающего поля и достигнуть анода. Следовательно,

$$\frac{mv_{\text{max}}^2}{2} = eU_3.$$

При изучении вольт-амперных характеристик разнообразных материалов при различных частотах падающего на катод излучения и различных энергетических освещенностях катода и обобщении полученных данных были установлены следующие **три закона внешнего фотоэффекта**.

I. **Закон Столетова**: при фиксированной частоте падающего света число фотоэлектронов, вырываемых из катода в единицу времени, пропорционально интенсивности света.

II. Максимальная начальная скорость (максимальная начальная кинетическая энергия) фотоэлектронов не зависит от интенсивности падающего света, а определяется только его частотой ν .

III. Для каждого вещества существует **красная граница фотоэффекта**, т. е. минимальная частота ν_{min} света (зависящая от химической природы вещества и состояния его поверхности), ниже которой фотоэффект невозможен.

Законы фотоэффекта, а также его **безынерционность** нельзя объяснить с помощью волновой теории. Объяснение этих явлений возможно только в рамках квантовой теории (см. Эйнштейна уравнение для фотоэффекта).

ФРАНКА И ГЕРЦА ОПЫТЫ — опыты, подтвердившие существование дискретных энергетических уровней. В откачанной вакуумной трубке ускоренные электроны бомбардировали атомы ртути. Согласно боровской теории каждый из атомов ртути может получить лишь вполне определенную энергию, переходя при этом в одно из возбужденных состояний. Поэтому если в атомах действительно существуют стационарные состояния, то электроны, сталкиваясь с атомами ртути, должны терять энергию дискретно, определенными порциями, равными разности энергий соответствующих стационарных состояний атома.

При определении зависимости силы тока от ускоряющего электроны напряжения оказалось, что сначала сила тока росла (в данном случае столкновения электронов с атомами ртути упругие, поэтому энергия атому не передается), а при $E = e\varphi = 4,86$ эВ сила тока резко уменьшалась (столкновения неупругие, атом поглощает энергию 4,86 эВ и переходит в возбужденное состояние). Таким образом, электроны при столкновении с атомами ртути передают атомам *определенные* порции энергии, т. е. идея Бора о существовании дискретных состояний (*п е р в ы й п о с т у л а т Б о р а*) получила экспериментальное подтверждение.

Возбужденный атом через некоторое время ($\sim 10^{-8}$ с) должен перейти в основное состояние, излучая при этом, согласно *второму постулату Бора*, световой квант с частотой $\nu = \Delta E/h$. По известному значению $\Delta E = 4,86$ эВ можно вычислить длину волны излучения: $\lambda = hc/\Delta E \approx 255$ нм. Таким образом, если теория верна, то атомы ртути, бомбардируемые электронами с энергией 4,86 эВ, должны являться источником ультрафиолетового излучения с $\lambda \approx 255$ нм. Опыт действительно обнаруживает ультрафиолетовую линию с $\lambda \approx 254$ нм.

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ. Согласно современным представлениям в природе осуществляется *четыре типа фундаментальных взаимодействий*.

1. **Сильное взаимодействие** обуславливает связь протонов и нейтронов в ядрах атомов и обеспечивает исключительную прочность этих образований, лежащую в основе стабильности вещества в земных условиях.

2. **Электромагнитное взаимодействие** характерно для всех элементарных частиц, за исключением нейтрино, антинейтрино-

но и фотона. Электромагнитное взаимодействие, в частности, ответственно за существование атомов и молекул, обуславливая взаимодействие в них положительно заряженных ядер и отрицательно заряженных электронов.

3. Слабое взаимодействие ответственно за взаимодействие частиц, происходящих с участием нейтрино или антинейтрино (например, β -распад, μ -распад), а также за безнейтринные процессы распада, характеризующиеся довольно большим временем жизни распадающейся частицы ($\tau \geq 10^{-10}$ с). Оно наиболее медленное из всех взаимодействий, протекающих в микромире.

4. Гравитационное взаимодействие присуще всем без исключения частицам, однако из-за малости масс элементарных частиц оно пренебрежимо мало, но может быть существенно на расстояниях $\sim 10^{-35}$ м.

Сильное взаимодействие примерно в 100 раз превосходит электромагнитное и в 10^{14} раз — слабое. Чем сильнее взаимодействие, тем с большей интенсивностью протекают процессы. Как сильное, так и слабое взаимодействия — короткодействующие. Радиус действия сильного взаимодействия составляет примерно 10^{-15} м, слабого — не превышает 10^{-19} м. Радиус действия электромагнитного взаимодействия практически не ограничен.

ЦЕПНАЯ РЕАКЦИЯ ДЕЛЕНИЯ. Испускаемые при делении ядер вторичные нейтроны могут вызвать новые акты деления, что делает возможным осуществление **цепной реакции деления** — ядерной реакции, в которой частицы, вызывающие реакцию, образуются как продукты этой реакции. Цепная реакция деления характеризуется **коэффициентом размножения k** нейтронов, который равен отношению числа нейтронов в данном поколении к их числу в предыдущем поколении. *Необходимым условием* для развития цепной реакции деления является *требование* $k \geq 1$. При $k > 1$ идет **развивающаяся реакция**, число делений непрерывно растет и реакция может стать взрывной. При $k = 1$ идет **самоподдерживающаяся реакция**, при которой число нейтронов с течением времени не изменяется. При $k < 1$ идет **затухающая реакция**.

Цепные реакции делятся на **управляемые и неуправляемые**. Взрыв атомной бомбы, например, является неуправляемой ре-

акций. Чтобы атомная бомба при хранении не взорвалась, в ней ${}_{92}^{235}\text{U}$ (или ${}_{94}^{239}\text{Pu}$) делится на две удаленные друг от друга части с массами ниже критических. (**Критическая масса** — минимальная масса делящегося вещества, необходимая для осуществления цепной реакции.) Затем с помощью обычного взрыва эти массы сближаются, общая масса делящегося вещества становится больше критической и возникает взрывная цепная реакция, сопровождающаяся мгновенным выделением огромного количества энергии и большими разрушениями. Управляемые цепные реакции осуществляются в ядерных реакторах.

ЭЙНШТЕЙНА УРАВНЕНИЕ ДЛЯ ФОТОЭФФЕКТА. Это уравнение выведено на основе квантовой теории фотоэффекта, согласно которой свет частотой ν не только *испускается*, но и *распространяется* в пространстве и *поглощается* веществом отдельными порциями (к в а н т а м и), энергия которых $\mathcal{E} = h\nu$.

По Эйнштейну, каждый квант поглощается только одним электроном. Поэтому число вырванных фотоэлектронов должно быть пропорционально интенсивности света (I закон фотоэффекта). Безынерционность фотоэффекта объясняется тем, что передача энергии при столкновении фотона с электроном происходит почти мгновенно.

Энергия падающего фотона расходуется на совершение электроном работы выхода A из металла и на сообщение вылетевшему фотоэлектрону максимальной кинетической энергии $mv_{\max}^2/2$. По закону сохранения энергии

$$h\nu = A + \frac{mv_{\max}^2}{2} \quad \text{— уравнение Эйнштейна для фотоэффекта.}$$

Оно позволяет объяснить II и III законы фотоэффекта. Из уравнения Эйнштейна следует, что максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона линейно возрастает с увеличением частоты падающего излучения и не зависит от его интенсивности (числа фотонов), так как ни A , ни ν от интенсивности света не зависят (II закон фотоэффекта). Так как с уменьшением частоты света кинетическая энергия фотоэлектронов уменьшается (для данного металла $A = \text{const}$), то при некоторой достаточно малой частоте $\nu = \nu_{\min}$ кинетическая энергия

фотоэлектронов станет равной нулю и фотоэффект прекратится (III закон фотоэффекта). Тогда из уравнения Эйнштейна получается, что

$$v_{\min} = \frac{A}{h} \quad (1)$$

и есть красная граница фотоэффекта для данного металла. Она зависит лишь от работы выхода электрона, т. е. от химической природы вещества и состояния его поверхности.

Выражение (1) можно представить в виде

$$\lambda_{\max} = \frac{hc}{A},$$

где λ_{\max} — максимальная длина волны падающего света (соответствует минимальной частоте v_{\min}), при которой фотоэффект еще возможен.

Уравнение Эйнштейна можно записать в виде

$$h(v - v_{\min}) = eU_3$$

(учли выражение (1) и $\frac{mv_{\max}^2}{2} = eU_3$ (см. **Фот о э ф ф е к т , з а к о н ы**), где U_3 — за д е р ж и в а ю щ е е н а п р я ж е н и е).

ЭЛЕКТРОН — стабильная элементарная частица, имеет отрицательный заряд, равный $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, — минимальный электрический заряд, наблюдаемый в природе у свободных частиц (называется **элементарным электрическим зарядом**). Масса электрона $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$ кг, с п и н $\frac{1}{2}$ (в единицах \hbar). Является самым легким заряженным лептоном. Участвует (кроме гравитационного) в электромагнитном и слабом взаимодействиях. Входит в состав всех атомов, образуя их электронную оболочку: электронные оболочки атомов определяют оптические, электрические и магнитные свойства атомов.

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ, КЛАССИФИКАЦИЯ. Элементарные частицы объединяются в три группы: *фот о н ы*, *л е п т о н ы* и *а д р о н ы* (адроны, в свою очередь, делятся на *м е з о н ы* и *б а р и о н ы*). Элементарные частицы (см. таблицу), отнесенные

Группа	Название частицы	Символ		Заряд, ед. e	Масса, ед. m_e	Спин, ед. \hbar	Приближительное время жизни, с		
		час-тицы	античас-тицы						
Фотоны	Фотон	γ		0	0	1	Стабилен		
Лептоны	Электрон	e^-	e^+	1	1	$\frac{1}{2}$	Стабилен		
	Электронное нейтрино	ν_e	$\bar{\nu}_e$	0	0	$\frac{1}{2}$	Стабильно		
	Мюон	μ^-	μ^+	1	206,8	$\frac{1}{2}$	$\approx 10^{-6}$		
	Мюонное нейтрино	ν_μ	$\bar{\nu}_\mu$	0	0	$\frac{1}{2}$	Стабильно		
	Тау-лептон	τ^-	τ^+	1	3492	$\frac{1}{2}$	$\approx 10^{-12}$		
	Таонное нейтрино	ν_τ	$\bar{\nu}_\tau$	0	0	$\frac{1}{2}$?		
Адроны	Мезоны	Пи-мезоны	π^0	π^-	0	264,1	0	$\approx 10^{-16}$	
			π^+		1	273,1	0	$\approx 10^{-8}$	
		Ка-мезоны	K^0	\bar{K}^0	0	974,0	0	$10^{-10} - 10^{-8}$	
			K^+	K^-	1	966,2	0	$\approx 10^{-8}$	
	Эта-мезон	η^0		1	1074	0	$\approx 10^{-19}$		
	Барионы	Протон	p	\bar{p}	1	1836,2	$\frac{1}{2}$	Стабилен	
		Нейтрон	n	\bar{n}	0	1838,7	$\frac{1}{2}$	$\approx 10^3$	
		Гипероны: лямбда	Λ^0	Λ^0	0	2183	$\frac{1}{2}$	$\approx 10^{-10}$	
			сигма	Σ^0	Σ^0	0	2334	$\frac{1}{2}$	$\approx 10^{-20}$
				Σ^+	Σ^+	1	2328	$\frac{1}{2}$	$\approx 10^{-10}$
		кси	Σ^-	Σ^-	1	2343	$\frac{1}{2}$	$\approx 10^{-10}$	
			Ξ^0	Ξ^0	0	2573	$\frac{1}{2}$	$\approx 10^{-10}$	
			Ξ^-	Ξ^-	1	2586	$\frac{1}{2}$	$\approx 10^{-10}$	
		омега	Ω^-	Ω^-	1	3273	$\frac{3}{2}$	$\approx 10^{-10}$	

к каждой из этих групп, обладают общими свойствами и характеристиками, которые отличают их от частиц другой группы.

ЭНЕРГИЯ АТОМА ВОДОРОДА ПО БОРУ. Согласно второму закону Ньютона для электрона, движущегося под действием кулоновской силы, в атоме водорода

$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n^2} = \frac{m_e v_n^2}{r_n},$$

где m_e и v_n — скорость электрона по орбите радиуса r_n , ϵ_0 — электрическая постоянная.

Кинетическая энергия электрона в атоме водорода:

$$\frac{m_e v^2}{2} = \frac{1}{2} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r},$$

потенциальная энергия взаимодействия электрона с ядром:

$$E_{\text{п}} = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}.$$

Полная энергия атома складывается из кинетической энергии электрона и потенциальной энергии взаимодействия электрона с ядром:

$$E = -\frac{1}{2} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}.$$

ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ ЯДРА — энергия, которую необходимо затратить, чтобы расщепить ядро на отдельные нуклоны. Энергия связи нуклонов в ядре

$$E_{\text{св}} = [Zm_p + (A - Z)m_n - m_{\text{я}}] c^2 = [Zm_{\text{H}} + (A - Z)m_n - m] c^2,$$

где m_p , m_n , $m_{\text{я}}$ — соответственно масса протона, нейтрона и ядра; $m_{\text{H}} = m_p + m_e$ — масса атома водорода ${}^1_1\text{H}$, m — масса атома.

Величина

$$\Delta m = [Zm_p + (A - Z)m_n] - m_{\text{я}}$$

называется **дефектом массы ядра**. Тогда энергия связи ядра

$$E_{\text{св}} = \Delta m c^2.$$

Удельная энергия связи — энергия связи, отнесенная к одному нуклону. Она характеризует устойчивость (прочность)

атомных ядер, т. е. чем больше $E_{\text{св}}/A$, тем устойчивее ядро. Удельная энергия связи зависит от массового числа A элемента (рис. 147). Для легких ядер ($A \leq 12$) удельная энергия связи круто возрастает до $6 \div 7$ МэВ, претерпевая целый ряд скачков (например, для ${}^2_1\text{H}$ — 1,1 МэВ, для ${}^4_2\text{He}$ — 7,1 МэВ, для ${}^6_3\text{Li}$ — 5,3 МэВ), затем более медленно возрастает до максимальной величины 8,7 МэВ у элементов с $A = 50 \div 60$, а потом постепенно уменьшается у тяжелых элементов (например, для ${}^{238}_{92}\text{U}$ она составляет 7,6 МэВ).

Из рис. 147 следует, что наиболее устойчивыми с энергетической точки зрения являются ядра средней части таблицы Менделеева. Тяжелые и легкие ядра менее устойчивы. Это означает, что энергетически выгодны следующие процессы: 1) деление тяжелых ядер на более легкие; 2) слияние легких ядер друг с другом в более тяжелые. При обоих процессах выделяется огромное количество энергии; эти процессы в настоящее время осуществлены практически: реакции деления и термоядерные реакции.

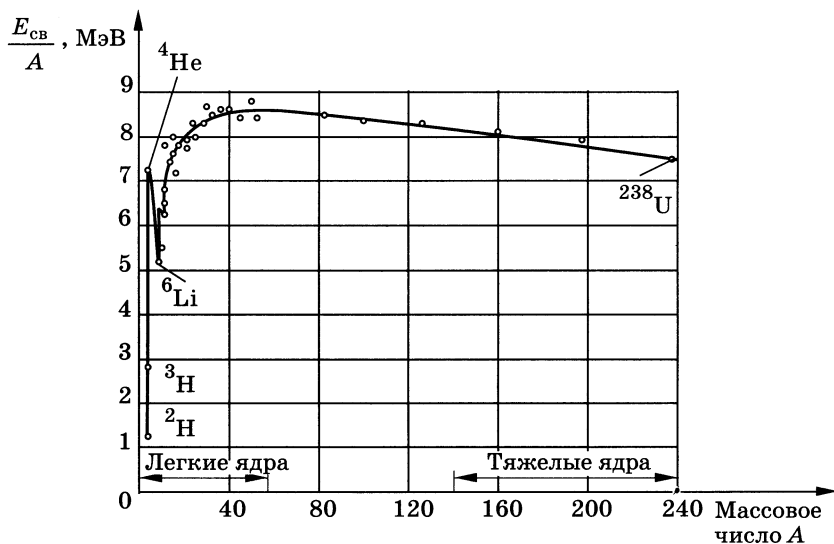
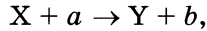


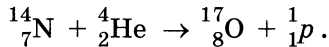
Рис. 147

ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ, КЛАССИФИКАЦИЯ. Ядерные реакции — это превращения атомных ядер при взаимодействии с элементарными частицами (в том числе и с γ -квантами) или друг с другом. Символическая запись ядерной реакции:



где X и Y — исходное и конечное ядра, a и b — бомбардирующая и испускаемая (или испускаемые) в ядерной реакции частицы.

Первая в истории ядерная реакция (Резерфорд, 1919 г.):



В любой ядерной реакции выполняются законы сохранения электрических зарядов и массовых чисел: *сумма зарядов (и сумма массовых чисел) ядер и частиц, вступающих в ядерную реакцию, равна сумме зарядов (и сумме массовых чисел) конечных продуктов (ядер и частиц) реакции.* Выполняются также законы сохранения энергии, импульса и момента импульса.

В отличие от радиоактивного распада, который протекает всегда с выделением энергии, **ядерные реакции** могут быть как **экзотермическими** (с выделением энергии), так и **эндотермическими** (с поглощением энергии).

Условная классификация ядерных реакций:

1) *по роду участвующих в них частиц* — реакции под действием нейтронов; реакции под действием заряженных частиц (например, протонов, дейтронов, α -частиц); реакции под действием γ -квантов;

2) *по энергии вызывающих их частиц* — реакции при малых энергиях (порядка электрон-вольт), происходящие в основном с участием нейтронов; реакции при средних энергиях (до нескольких мегаэлектрон-вольт), происходящие с участием γ -квантов и заряженных частиц (протоны, α -частицы); реакции при высоких энергиях (сотни и тысячи мегаэлектрон-вольт), приводящие к рождению отсутствующих в свободном состоянии элементарных частиц и имеющие большое значение для их изучения;

3) *по роду участвующих в них ядер* — реакции на легких ядрах ($A < 50$); реакции на средних ядрах ($50 < A < 100$); реакции на тяжелых ядрах ($A > 100$);

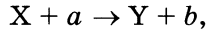
4) по характеру происходящих ядерных превращений — реакции с испусканием нейтронов; реакции с испусканием заряженных частиц; реакции захвата (в этих реакциях составное ядро не испускает никаких частиц, а переходит в основное состояние, излучая один или несколько γ -квантов).

ЯДЕРНЫЕ СИЛЫ — силы, действующие между составляющими ядро нуклонами и значительно превышающие кулоновские силы отталкивания между протонами. Относятся к классу сильных взаимодействий.

Свойства ядерных сил: 1) являются *силами притяжения*; 2) являются *короткодействующими* (их действие проявляется на расстояниях $\sim 10^{-15}$ м); 3) им свойственна *зарядовая независимость* (они одинаковы при взаимодействии двух протонов, двух нейтронов или протона и нейтрона, т. е. ядерные силы имеют *неэлектростатическую природу*); 4) обладают свойством *насыщения* (каждый нуклон взаимодействует только с ограниченным числом ближайших к нему нуклонов); 5) зависят от *взаимной ориентации спинов* взаимодействующих нуклонов; 6) *не являются центральными*, т. е. действующими по линии, соединяющей центры взаимодействующих нуклонов.

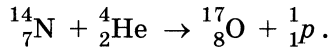
ЯДЕРНЫЕ ФОТОЭМУЛЬСИИ — это простейший трековый детектор заряженных частиц. Прохождение заряженной частицы в эмульсии вызывает ионизацию, приводящую к образованию центров скрытого изображения. После проявления следы заряженных частиц обнаруживаются в виде цепочки зерен металлического серебра. Так как эмульсия — среда более плотная, чем газ или жидкость, используемые в вильсоновской и пузырьковой камерах, то при прочих равных условиях длина трека в эмульсии более короткая. Так, трек длиной 0,05 см в эмульсии эквивалентен треку в 1 м в камере Вильсона. Поэтому фотоэмульсии применяются для изучения реакций, вызываемых частицами в ускорителях сверхвысоких энергий и в космических лучах. В практике исследований высокоэнергетических частиц используются также так называемые **стопы** — большое число маркированных фотоэмульсионных пластинок, помещаемых на пути частиц и после проявления промеряемых под микроскопом.

ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ, КЛАССИФИКАЦИЯ. Ядерные реакции — это превращения атомных ядер при взаимодействии с элементарными частицами (в том числе и с γ -квантами) или друг с другом. Символическая запись ядерной реакции:



где X и Y — исходное и конечное ядра, a и b — бомбардирующая и испускаемая (или испускаемые) в ядерной реакции частицы.

Первая в истории ядерная реакция (Резерфорд, 1919 г.):



В любой ядерной реакции выполняются законы сохранения электрических зарядов и массовых чисел: *сумма зарядов (и сумма массовых чисел) ядер и частиц, вступающих в ядерную реакцию, равна сумме зарядов (и сумме массовых чисел) конечных продуктов (ядер и частиц) реакции.* Выполняются также законы сохранения энергии, импульса и момента импульса.

В отличие от радиоактивного распада, который протекает всегда с выделением энергии, **ядерные реакции** могут быть как **экзотермическими** (с выделением энергии), так и **эндотермическими** (с поглощением энергии).

Условная классификация ядерных реакций:

1) *по роду участвующих в них частиц* — реакции под действием нейтронов; реакции под действием заряженных частиц (например, протонов, дейтронов, α -частиц); реакции под действием γ -квантов;

2) *по энергии вызывающих их частиц* — реакции при малых энергиях (порядка электрон-вольт), происходящие в основном с участием нейтронов; реакции при средних энергиях (до нескольких мегаэлектрон-вольт), происходящие с участием γ -квантов и заряженных частиц (протоны, α -частицы); реакции при высоких энергиях (сотни и тысячи мегаэлектрон-вольт), приводящие к рождению отсутствующих в свободном состоянии элементарных частиц и имеющие большое значение для их изучения;

3) *по роду участвующих в них ядер* — реакции на легких ядрах ($A < 50$); реакции на средних ядрах ($50 < A < 100$); реакции на тяжелых ядрах ($A > 100$);

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

- Аберрации линз 204
- Абсолютная влажность воздуха 58
- Абсолютно неупругое тело 54
- твердое тело (твердое тело) 54
 - упругое тело 54
- Абсолютный показатель преломления 214
- Авогадро закон 58
- постоянная 58
- Автоколебания 174
- Агрегатные состояния вещества 58
- Адиабата 59
- Адиабатный процесс 69
- Адроны 238
- Активная зона 277
- среда 249
- Акустический спектр, линейчатый 178
- — сплошной 178
- Альфа-излучение 260
- Альфа-распад 238
- Альфа-частицы 238, 253
- Амплитуда колебаний 183
- Аморфное тело 100
- Ампер (единица силы тока) 4, 166
- Ампера закон 115
- Анализатор 226
- Анизотропия 101
- Аннигиляция 258
- Антикварк 250
- Антинейтрино 242
- Антинейтрон 239
- Антипротон 240
- Античастицы 240
- Архимеда закон 7

Астигматизм 205
 Атом 60
 Атомное ядро, характеристики 240
 Атомные кристаллы 79

Б

Бальмера серия 251
 — формула 251
 Барионы 238
 Безынерционность фотоэффекта 267
 Бел 178
 Бернулли уравнение 7
 Бета-излучение 260
 Бета-распад 241
 Бойля—Мариотта закон 60
 Больцмана постоянная 61
 Бора постулат второй 244
 — — первый 243
 — постулаты 243
 Броуновское движение 83

В

Вакансия 64
 Ван-дер-Ваальса уравнение 109
 Ватт (единица мощности) 28
 Вебер (единица магнитного потока) 136

Вектор перемещения 8, 9
 Векторные диаграммы для цепей переменного тока 201
 Вечный двигатель второго рода 63
 — — первого рода 89
 Вес тела 9
 Взаимодействие параллельных токов 115
 Вильсона камера 244
 Винтовые дислокации 65
 Вихревое электрическое поле 117
 Вихревые токи (токи Фуко) 118
 Внешнее трение 50
 Внешние силы 9
 Внутреннее давление 109
 — трение 50
 Внутренние силы 10
 Внутренняя энергия идеального газа 61
 — — термодинамической системы 62
 Водоструйный насос 47
 Возбужденное состояние 264
 Возбужденный энергетический уровень 264
 Волновая оптика 223
 — поверхность 185

Волновой процесс (волна) 174

— фронт 185

Вольт (единица потенциала) 143

Вольт-амперная характеристика фотоэффекта 266

Время реверберации 178

Вращательное движение 48

Вторая космическая скорость 24

Второе начало термодинамики 62

Вынужденное излучение 248

Вынужденный переход 248

Вынужденные механические колебания 175

— электромагнитные колебания 175

Высокотемпературная плазма 91

Высота звука 178

Вязкие материалы 67

Вязкость (внутреннее трение) 10

Г

Газовый лазер 255

— разряд, виды 118

Газоразрядная плазма 91

Газоразрядный счетчик 245

Галилея обобщенный закон 54

— преобразования координат 11

— принцип относительности 12

Гамма-излучение 260

Гармонические колебания 179

Гей-Люссака закон 63

Гейгера—Мюллера счетчик 245

Гелиоцентрическая (звездная) система отсчета 22

Генератор переменного тока, модель 176

Генри (единица индуктивности) 124

Геометрическая оптика 222

Герц (единица частоты) 183

Гидроаэромеханика 13

Гидродинамика 13

Гидродинамическое трение 50

Гидростатика 13

Гидростатическое давление 13, 14

Гипотеза 4

Главная оптическая ось линзы 220

- — — сферического зеркала 234
- Главное квантовое число 264
 - фокусное расстояние сферического зеркала 235
- Главный фокус сферического зеркала 235
- Гравитационная постоянная 19
 - сила 19
- Гравитационное взаимодействие 269
- Градиент скорости 10
- Граничное трение 50
- Граница сплошного спектра 232
- График волны 196
- Громкость звука 177
- Гука закон 63
- Гюйгенса принцип 205
- Гюйгенса—Френеля принцип 210

- Д**
- Давление 14
 - жидкости 14
 - света 245
 - электромагнитных волн 202
- Дальтона закон 64
- Движение тела, брошенного вертикально вверх 14
 - — — горизонтально 15
 - — — под углом к горизонту 16
 - заряженных частиц в магнитном поле 121
- Действующее значение напряжения 184
 - — силы тока 184
- Дефект массы 273
- Дефекты кристаллической решетки 64
- Деформация твердого тела 65
- Джоуль (единица работы) 34
- Джоуля—Ленца закон 148
- Диаграмма напряжений 66
 - состояния (фазовая диаграмма) 67
 - — анализ 68
- Диамагнетики 137
- Динамика 26
- Динамическая вязкость 10
- Динамическое давление 8
- Диоптрия (единица оптической силы линзы) 220
- Дислокации 65
- Дисперсия света 207
- Диссипативная сила 17

— система 17, 174

Диссипация (рассеяние) энергии 17

Дифракционная решетка 208

Дифракционный максимум, условие 209

— спектр 212

Дифракция волн 210

— в параллельных лучах 211

— света 210

— — на щели 211

Диффузионная камера 246

Диффузия 83

Диэлектрики 122

— типы 122

Диэлектрическая проницаемость среды 129, 143

Длина волны 197

— пути 8

— тел в разных системах отсчета 17

Длительность событий в разных системах отсчета 18

Домены 137

Дочернее ядро 247

Друде теория 171

Дуговой разряд 120

Дырочная проводимость (проводимость р-типа) 146

Е

Единица импульса 22

— интенсивности звука 177

— молярного объема 85

— молярной массы 85

— — теплоемкости 103

— напряжения 167

— напряженности электростатического поля 138

— плотности 24

— — потока электромагнитного излучения 186

— — тока 166

— поверхностного натяжения 93

— скорости 46

— теплоемкости 103

— удельной теплоемкости 103

— — электропроводности 156

— ускорения 53

— частоты 36

— ЭДС 167

Единицы физических величин 4

Емкостное сопротивление 198

Естественная радиоактивность 260

Естественный свет 225

Ж

Жидкостный лазер 255

Жесткость тела 64

Жидкость, свойства 68

З

Задерживающее напряжение 267

Закон взаимосвязи массы и энергии 40

— всемирного тяготения 18

— независимости световых пучков 213

— отражения 213

— — (вывод на основе принципа Гюйгенса) 206

— постоянства углов 101

— преломления 213

— — (вывод на основе принципа Гюйгенса) 206

— прямолинейного распространения света 212

— радиоактивного распада 247

— сложения скоростей в классической механике 12

— сохранения импульса 19

— — электрического заряда 123

— — массового числа 239

— — момента импульса 21

— — и превращения энергии 22

— — полной механической энергии 21

— — электрического заряда 123

Законы оптики основные 212

— фотоэффекта 267

Замкнутая (изолированная) система 22, 123

Замкнутый плоский контур с током 134

Запирающее (обратное) направление 127

Запирающий контактный слой 127

Заряд ядра 241

Зарядовое число 241

Затухающая цепная реакция 269

Затухающие колебания 175

Звуковые волны 177

И

Идеальная жидкость 7

Идеальный газ 111

Излучение, спонтанное и вынужденное 248

Измерение скорости потока жидкости (газа) 47

- Изобара 70
Изобарный процесс 70
Изобары 241
Изопроцессы 71
Изотерма 61
— реального газа 71
Изотермический процесс 72
Изотопы 241
Изотропия 100, 101
Изотропная среда 185
Изохора 73
Изохорный процесс 73
Импульс (количество движения) 22
Индуктивное сопротивление 198
Индуктивность контура 123
Индукционный ток 157
Индукцированные заряды 169
Инертность 22
Инерциальная система отсчета 22
Интенсивность волны 186
— звука 177
Интерференционный максимум, условие 214, 216
— минимум, условие 215, 217
Интерференция волн 214
— света 215
— — в тонких пленках 217
Интерферометр 218
— Майкельсона 218
Инфразвуковые волны 177
Инфракрасное излучение 219
Ионизатор 125
Ионизационная камера 249
Ионизация атома 264
— газов 124
Ионная связь 79
Ионные кристаллы 79
Интенсивность волны 186
— звука (сила звука) 177
Искровой разряд 120
Искусственная радиоактивность 260
Испарение 74
Источник тока 155
- К**
- Кандела (единица силы света) 5
Капилляр 74
Капиллярные явления 74
Карно теорема 75
— цикл 75
Катодолуминесценция 221

- Квант 257
- Квантовая механика 26
— теория фотоэффекта 270
- Кварки 250
- Кельвин (единица температуры) 4
- Кеплера законы 23
- Килограмм (единица массы) 4
- Кинематика 26
- Кинематические уравнения движения материальной точки 45
- Кинематическое уравнение равномерного движения 37
- Кинетическая энергия 23, 194
- Кипение 76
- Кирхгофа правила 125
- Клапейрона—Менделеева уравнение для 1 моль газа 76, 108
— — — произвольной массы газа 77, 108
- Классическая механика 26
- Ковалентная связь 79
- Когерентные волны 214
- Колебания 178
- Колебательный контур 179
- Количество вещества 77
— движения 22
- Кома 205
- Конвекционный ток 165
- Конвекция 104
- Конденсатор 160
- Конденсация 177
- Консервативная сила 31
- Консервативная система 21
- Контакт полупроводников p - и n -типов 126
- Коронный разряд 120
- Координационное число 77
- Корпускулярно-волновой дуализм 258
- Космические скорости 23
- Коэффициент мощности 183
— размножения 269
— трансформации 195
- Краевой угол 98
- Краевые дислокации 65
- Криволинейное движение 50
- Кривые фазового равновесия 67
- Кристаллизация (затвердевание) 78
- Кристаллическая решетка 100
- Кристаллическое тело (кристалл) 100
- Кристаллы, типы 78

Критическая масса 271
— температура 71
— точка 71
Критический объем 71
Критическое давление 71
— состояние 71
Круговая (циклическая) частота 183
Круговой процесс 80
Крутильные весы 19
Кулон (единица электрического заряда) 163
Кулона закон 128
Кулоновская сила 128
Кюри точка 137

Л

Лазер 255
Лаймана серия 251
Ламинарное течение 24
Ленца правило 129
Лептоны 251
Линейная среда 188
Линейное увеличение сферического зеркала 236
Линейные дефекты 65
— микродефекты 64
Линейчатые спектры 234

Линейчатый спектр атома водорода 251

Линзы 219

Линии напряженности электростатического поля 130
— магнитной индукции 131
— тока 51

Лоренца преобразования 24
— сила 132

Лоренцево сокращение длины 17

Лошмидта число 81

Луч 185

Люминесцентная дефектоскопия 222

Люминесцентный анализ 221

Люминесценция 221

Люминофоры 221

М

Магнетики 136

Магнитная индукция 133
— постоянная 133
— проницаемость среды 135

Магнитное поле 134
— — прямого тока 135

Магнитные свойства вещества 136

- Магнитный момент рамки с током 133
— поток 134
- Майера уравнение 104
- Майкельсона интерферометр 218
- Макроскопические дефекты 64
- Максимальная сила трения покоя 43
- Манометры 46
- Масса тела 26
- Массовое число 241
- Массовый излучатель 187
- Математический маятник 181
- Материальная точка 54
- Материнское ядро 247
- Материя 5
- Мгновенная мощность
— скорость 45
- Мгновенное ускорение 53
- Междоузельный атом 64
- Мезоны 238
- Мениск 74
- Металлические кристаллы 79
- Методы регистрации радиоактивных излучений и частиц 252
- Метр (единица длины) 4
- Механика, структура 26
- Механическая система 26
- Механический момент сил 138
- Механические гармонические колебания 182
- Механическое движение 26
- Микроскопические дефекты 64
- Модели атома 252
- Модуль Юнга 63
- Молекула 82
- Молекулярная физика 82
- Молекулярное (внутреннее) давление 70
- Молекулярно-кинетическая теория, опытное подтверждение 83
— — основные положения 82
- Молекулярные кристаллы 80
— токи 136
- Моль (единица количества вещества) 5
- Молярная газовая постоянная 84
— масса вещества 84
— теплоемкость 103
— — при постоянном давлении 103
— — — — объеме 103

Молярный объем 85
Момент импульса 27
— силы 27
Монокристалл 100
Монохроматические волны 215
Мощность 28
— переменного тока 183
— тока 149

Н

Нагреватель 102
Наиболее вероятная скорость 113
Накачка 249
Напряжение 167
— механическое 85
Напряженность поля точечного заряда 139
— электростатического поля 138
Насыщенный пар 77, 85
Начальная фаза колебания 183
Невесомость 9
Нейтрино 254
Нейтрон 255
Нейтроны деления 261
Необратимый процесс 86

Неинерциальные системы отсчета 28
Ненасыщенный пар 77, 86
Неполярные диэлектрики 122
— молекулы 122
Непрерывные спектры 233
Несамостоятельный газовый разряд 119
Несжимаемая жидкость 13
Неуправляемые цепные реакции 269
Нормальная сила 32
— составляющая ускорения 53
Нормальное напряжение 85
Носители тока 165
Нуклоны 241
Нуль кельвина 102
Ньютон (единица силы) 42
Ньютона законы 28
— кольца 222

О

Область текучести 67
Обратимый процесс 86
Обратный процесс 81
— цикл 81
Объемная плотность энергии электростатического поля 173

- Однородное магнитное поле 153
— электростатическое поле 130
- Ом (единица сопротивления) 154
- Ома закон для цепи переменного тока 200
— законы 139
- Ом (единица электрического сопротивления) 154
- Ом-метр (единица удельного электрического сопротивления) 154
- Оптика, структура 222
- Оптическая длина пути 216
— ось сферического зеркала 234
— сила линзы 220
— — сферического зеркала 236
— разность хода 216
— толщина пленки 230
- Оптически более плотная среда 223
— однородная среда 212
- Оптический квантовый генератор 255
— резонатор 255
— центр линзы 220
— — сферического зеркала 234
- Опыт 5
— Рикке 170
- Основное состояние 264
— уравнение молекулярно-кинетической теории 86
- Основной закон релятивистской динамики 40
— энергетический уровень 264
- Основные единицы 4
- Ось вращения 48
- Открытый колебательный контур (вibrator Герца) 187
- Относительная влажность воздуха 88
— деформация 66
- Относительное поперечное растяжение (сжатие) 66
— продольное растяжение (сжатие) 66
- Относительность одновременности 30
- Относительный показатель преломления 213
- П**
- Пар 72
- Парамагнетики 136
- Парообразование 88
- Парциальное давление 64

- Паскаль (единица давления) 14
— (единица механического напряжения) 85
- Паскаль-секунда (единица вязкости) 10
- Паскаля закон 30
- Пашена серия 251
- Первая космическая скорость 23
- Первое начало термодинамики 88
— — — применение к изо-процессам 90
- Переменный ток 185
- Переохлажденная жидкость 78
- Период вращения 36
— гармонического колебания 183
— дифракционной решетки 208
— полураспада 247
- Периодические процессы 178
- Пито—Прандтля трубка 47
- Плавление 91
- Плазма, свойства 91
- Планка квантовая гипотеза 257
— постоянная 244, 257
- Пластическая деформация 65
- Плечо диполя 162
— силы 28
- Плоский конденсатор 160
- Плоское зеркало 223
- Плоские волны 185
- Плоскополяризованный свет 226
- Плоскость поляризации 226
- Плотность вещества 30
— потока электромагнитного излучения 186
— тока 166
- Побочная оптическая ось линзы 220
- Поверхностная плотность заряда 164
— энергия 93
- Поверхностно-активные вещества 93
- Поверхностное натяжение 92
- Позитрон 258
- Показатель адиабаты 60
- Поликристалл 101
- Полимеры 94
- Полная механическая энергия 30
— энергия гармонического колебания 194

- Полное давление 8
 — отражение 223
 — сопротивление цепи переменного тока 200
- Полосатые спектры 234
- Полупроводники 140
 — *n*-типа 145
 — *p*-типа 146
- Полупроводниковый диод 140
 — лазер 255
 — плоскостной диод 141
 — точечный диод 141
 — счетчик 258
- Получение электромагнитных волн 187
- Полус сферического зеркала 234
- Полярные диэлектрики 122
 — молекулы 123
- Поляризация диэлектриков 142
 — света 225
- Поляризованный свет 226
- Поляризаторы 226
- Поперечность электромагнитных волн 202
- Поперечные волны 196
- Порог болевого ощущения 177
 — слышимости 177
- Построение изображения предмета в линзах 228
 — — — сферических зеркалах 227
- Постоянный ток 166
- Поступательное движение 48
- Потенциал 143
 — электростатического поля 143
 — — — точечного заряда 144
- Потенциальная энергия 31, 194
 — — заряда Q_0 в поле заряда Q 144
- Потенциальное поле 31
- Поток 51
- Правило левой руки 115, 132
 — правого винта 27, 131, 134
 — смещения для α -распада 238
 — — — β -распада 241
- Прямолинейное движение 50
- Предел пропорциональности 66
 — прочности 67
 — текучести 66
 — упругости 66
- Предельный угол 223

- Призматический (дисперсионный) спектр 208
- Примесная проводимость полупроводников 145
- Примесный атом 64
- Примесь внедрения 64
— замещения 64
- Принцип зарядового сопряжения 240
— независимости действия сил 32
— суперпозиции волн 187
— — магнитных полей 146
— — электростатических полей 146
- Пробный точечный положительный заряд 170
- Проводники 147
— второго рода 147
— в электростатическом поле 147
— первого рода 147
- Продольные волны 196
- Производные единицы 8
- Пропорциональный счетчик 245
- Пропускное (прямое) направление 128
- Просветление оптики 229
- Протон 163, 259
- Пружинный маятник 188
- Прямой цикл 80
- Прямолинейное движение 36
- Пуассона уравнение 94
- Пузырьковая камера 259
- Р**
- Работа газа при изменении его объема 95
— выхода 259
— силы 33
— — тяжести 34
— — упругости 35
— тока 148
— сил электростатического поля 149
- Рабочее тело 96
- Равнозамедленное прямолинейное движение 38
- Равномерное движение 35
— — по окружности 35
— прямолинейное движение 36
- Равнопеременное прямолинейное движение 37
- Равноускоренное прямолинейное движение 38
— — — графики 39

- Радян (единица плоского угла) 5
- Радиоактивность 260
- Радиоактивный распад 247
- Радиолюминесценция 221
- Радиус молекулярного действия 69
- Развивающаяся цепная реакция 269
- Разность потенциалов 149
— хода волн 214
- Разрешающая способность оптических инструментов 231
- Рассеивающая линза 220
- Реактивное сопротивление 200
- Реакция деления ядра 261
— синтеза атомных ядер 262
- Реальный газ 96
- Реверберация звука 178
- Резонанс в цепи переменного тока 189
— механический 190
— электрический 191
- Резонансная циклическая частота 190
- Рекомбинация 125
- Релятивистская динамика 40
— механика 26
- Релятивистские явления 57
- Релятивистский закон сложения скоростей 41
— импульс 40
- Релятивистское замедление времени 18
- Рентгеновское излучение 231
- Рентгенолюминесценция 221
- Рентгеноструктурный анализ 97, 233
- Реперные точки 97
- Ридберга постоянная 251
- Рикке опыт 170
- Рэля критерий 231
- С**
- Самоиндукция 123
- Самоподдерживающаяся цепная реакция 269
- Самостоятельный газовый разряд 119
- Сверхпроводимость 150
- Световоды 224

- Световой вектор 225
- Световые лучи 222
- волны 233
- Свободное падение тел 41
- Свободные (собственные) колебания 179
- электромагнитные колебания 191
- Связанные (поляризационные) заряды 143
- Связь между напряженностью и потенциалом электростатического поля 150
- Секунда (единица времени) 4
- Сила 42
- всемирного тяготения 19
 - консервативная 31
 - нормального давления 42
 - поверхностного натяжения 93
 - реакции опоры 42
 - тока 166
 - трения качения 44
 - — покоя 43
 - — скольжения 44
 - тяжести 42
 - упругости 44
- Силы межмолекулярного взаимодействия 96
- трения 43
- Сильное взаимодействие 268
- Сименс (единица проводимости) 154
- Система отсчета 44
- накачки 255
- Скорость 45
- гармонического колебательного движения 193
 - распространения волны 197
- Слабое взаимодействие 269
- Следствия из уравнения Бернулли 46
- Смачивание 97
- Собирающая линза 220
- Собственная проводимость полупроводников 151
- частота контура 192
- Соединение конденсаторов в батарее 152
- проводников 153
- Соленоид 153
- Сопrotивление проводников 154
- Состояния с инверсией населенностей 249
- Спектральные цвета 208
- Спектры, типы 233
- поглощения 234

- Спектр атома водорода 263
— излучения 233
- Специальная теория относительности 56
- Спин 265
- Сплошная среда 175
- Спонтанное излучение 248
- Среднее ускорение 52
- Средняя квадратичная скорость 87, 98
— кинетическая энергия молекулы 99
— мощность 28
— скорость 45
- Статика 26
- Статистический метод 82
- Статическое давление 7
- Стационарное течение 52
- Степень диссоциации 168
— ионизации 91
- Стерadian (единица телесного угла) 5
- Стопа 276
- Столетова закон 267
- Сторонние силы 155
- Сублимация 74
- Сфера молекулярного действия 69
- Сферическая абберация 204
- Сферические волны 185
— зеркала 284
— — вогнутые 234
— — выпуклые 234
- Сцинтилляции 265
- Сцинтилляционный счетчик 265
- Т**
- Тангенциальная сила 32
— составляющая ускорения 53
- Тангенциальное напряжение 85
- Твердое тело 54, 100
— — вращательное движение 48
— — поступательное движение 48
- Твердотельный лазер 255
- Тело отсчета 49
- Тембр звука 178
- Температура 101
- Температурное излучение (поглощение) 105
- Температурные шкалы 101
- Теорема о кинетической энергии 49
- Теория Друзе 171
- Тепловое излучение 236

- Тепловой двигатель 102
Теплоемкость 103
Теплообмен 104
Теплопроводность 104
Термисторы 155
Термический коэффициент полезного действия для кругового процесса 81
— — — — цикла Карно 76
Термодинамика 106
Термодинамическая система 106
Термодинамические параметры 107
Термодинамический метод 106
— процесс 107
Термодинамическое равновесие 107
Термометры сопротивления 155
Термостат 107
Термоядерная реакция 263
Тесла (единица магнитной индукции) 133
Тлеющий разряд 120
Ток проводимости 165
Томсона формула 192
— модель атома 252
Тонкая линза 220
Тормозной спектр 232
Торричелли формула 48
Точечные микродефекты 64
Точечный электрический заряд 157
— источник 237
Точка росы 107
Траектория 50
Трансформатор повышающий 195
— понижающий 196
Трансформаторы 194
Триболюминесценция 221
Трение 50
— верчения 50
— качения 50
— покоя 50
— скольжения 50
Третья космическая скорость 24
Тройная точка 67
— — воды 102
Трубка тока 52
Турбулентное течение 51
- У**
- Ударная ионизация 120
Удельная теплоемкость 103
— — при постоянном давлении 103
— — — — объеме 103

- теплота парообразования 107
 - — плавления 107
 - электропроводность (проводимость) 156
 - энергия связи 273
 - Удельное электрическое сопротивление 154
 - Удельный объем 108
 - Уединенный проводник 161
 - Узел 125
 - Узлы кристаллической решетки 100
 - Ультразвуковые волны 177
 - Ультрафиолетовое излучение 237
 - Упругая гармоническая волна 196
 - деформация 65
 - Упругие волны 196
 - Упругость 108
 - Уравнение адиабатного процесса 94
 - состояния идеального газа 108
 - состояния реального газа (уравнение Ван-дер-Ваальса) 109
 - неразрывности 51
 - теплового баланса 105
 - Управляемые цепные реакции 269
 - Ускорение 52
 - гармонического колебательного движения 193
 - свободного падения 54
 - Установившееся течение 52
- Ф**
- Фаза 110
 - колебания 183
 - Фазовая скорость 197
 - Фазовый переход 110
 - Фарад (единица емкости) 128, 162
 - Фарадея закон для электролиза 168
 - — — электромагнитной индукции 156
 - классические опыты 157
 - Ферромагнетики 137
 - Физика 5
 - Физические законы 6
 - модели в механике 54
 - — — молекулярно-кинетической теории 111
 - — — оптике 237
 - — — электродинамике 157

Флуоресценция 221
Фокальные плоскости 220
Фокус линзы 220
Фокусное расстояние линзы 220
Формула сферического зеркала 235
— тонкой линзы 220
Фотон 258, 265
Фототок насыщения 267
Фосфоресценция 221
Фотолюминесценция 221
Фотоэлектронный умножитель 265
Фотоэффект, законы 265
Франка и Герца опыты 268
Фуко токи 118
Функция распределения молекул идеального газа по скоростям 112
Фундаментальные взаимодействия 268

Х

Характеристический рентгеновский спектр 233
Хемилюминесценция 221
Холодильная машина 113
Холодильник 102

Хроматическая аберрация 204
Хрупкие материалы 67

Ц

Центр масс (центр инерции) 54
— тяжести 55
Центры кристаллизации 78
Центростремительное ускорение 35
Цепная реакция деления 269
Цепь переменного тока с катушкой индуктивности 197
— — — с конденсатором 198
— — — с последовательно включенными резистором, катушкой индуктивности и конденсатором 199
— — — с резистором 200
Цикл 80

Ч

Частично поляризованный свет 226
Частота вращения 36
— колебаний 183
Число степеней свободы молекул 114

Ш

- Шарля законы 114
- Шкала электромагнитных излучений 201
- Штерна опыт 83

Э

- ЭДС индукции в движущихся проводниках 159
- Эйнштейна постулаты 56
 - уравнение для фотоэффекта 270
- Эквипотенциальные поверхности 159
- Экзотермические ядерные реакции 275
- Электрическая емкость (электроемкость) 161
 - постоянная 128
 - проводимость 154
- Электрический диполь 162
 - заряд, свойства 163
 - момент диполя (дипольный момент) 162
 - ток, характеристики 165
- Электрическое поле 164
 - — бесконечной проводящей поверхности 164
 - — двух бесконечно параллельных разноименно заряженных плоскостей 164
- Электродвижущая сила 166
 - — электромагнитной индукции 156
- Электродинамика, структура 167
- Электролиз 168
- Электрическая диссоциация 168
 - проводимость проводника 154
- Емкость плоского конденсатора 161
- Электролиты 168
- Электролюминесценция 221
- Электромагнитная индукция 157
- Электромагнитное взаимодействие 268
- Электромагнитные волны 202
 - колебания 179
- Электрон 163, 271
- Электрон-вольт 259
- Электронная проводимость (проводимость n -типа) 145
- Электростатическая защита 170
 - индукция 169

Электростатическое поле 170

Электрохимический эквивалент вещества 168

Элементарная классическая теория электропроводности металлов 170

— работа силы 33

Элементарный электрический заряд 163, 271

Элементарные частицы, классификация 271

Эндотермические ядерные реакции 275

Энергия 56

Энергия атома водорода по Бору 273

— гармонического колебательного движения 193

— ионизации 125

— магнитного поля 172

— покоя 40

— связи ядра 273

— электростатического поля 172

Ю

Юнга модуль 63

Я

Явление электромагнитной индукции 157

Ядерная (планетарная) модель атома 253

Ядерные реакции, классификация 275

— силы 276

— фотоэмульсии 276

Ядерный реактор 277

ОГЛАВЛЕНИЕ

Механика	7
Молекулярная физика и термодинамика	58
Электродинамика	115
Колебания и волны	174
Оптика	204
Квантовая физика	238
Предметный указатель	278

Издательство «КНОРУС» предлагает:



ДВИГАТЕЛИ АВТОТРАКТОРНОЙ ТЕХНИКИ

Шатров М.Г. под общ. ред. и др.

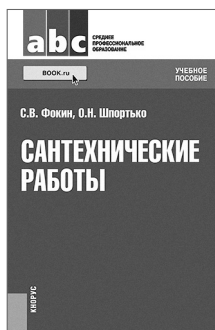
УЧЕБНИК. ГРИФ ФИРО (МИНОБРНАУКИ)

2016. 400 с. Переплет. ISBN 978-5-406-00448-7

Изложены теория, конструкция и эксплуатационные свойства современных автотракторных двигателей. Описаны принципы, работа и показатели двигателей внутреннего сгорания. Представлены их характеристики. Рассмотрены основы динамики автотракторных двигателей. Выполнен анализ конструкции и влияния эксплуатационных режимов работы на напряженно-деформированное состояние, надежность и долговечность элементов двигателя. Отражены перспективные направления развития автотракторных двигателей.

Соответствует ФГОС СПО 3+.

Для учащихся учреждений среднего профессионального образования. Может быть полезен для всех, кто желает получить системное представление о современных автотракторных двигателях.



САНТЕХНИЧЕСКИЕ РАБОТЫ

Фокин С.В., Шпортяко О.Н.

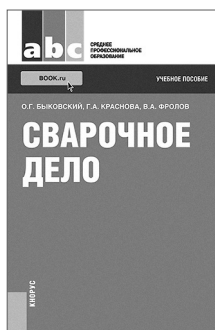
УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ. ГРИФ МИНОБРНАУКИ

2016. 464 с. Переплет. ISBN 978-5-406-04783-5

Рассматриваются санитарно-технические устройства и теоретические основы их работы; оборудование, приборы, котлы, применяемые в системах водоснабжения, канализации и отопления; организация и исполнение заготовительных, монтажных и ремонтных работ.

Соответствует ФГОС СПО 3+.

Для студентов образовательных учреждений среднего профессионального образования.



СВАРОЧНОЕ ДЕЛО

Быковский О.Г., Краснова Г.А., Фролов В.А.

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ. ГРИФ ФИРО (МИНОБРНАУКИ)

2016. 272 с. Переплет. ISBN 978-5-406-04889-4

Рассматриваются основные способы сварки, резки и контроля качества сварных швов и соединений. Приводятся рекомендации относительно выбора материалов, технологии и техники сварки и резки, особенностей использования современного оборудования, мероприятий по организации и охране труда при этих видах металлообработки.

Соответствует ФГОС СПО 3+.

Для студентов колледжей, обучающихся по специальности «Материаловедение и технологии материалов».

Все книги издательства «КНОРУС» смотрите в ЭБС BOOK.ru

УДК 373.167.1:54(075.32)

ББК 22.3я723

Т76

Автор

Т.И. Трофимова, профессор МИЭМ НИУ «Высшая школа экономики»

Трофимова Т.И.

Т76 Физика от А до Я : справочное пособие / Т.И. Трофимова. — 2-е изд., стер. — М. : КНОРУС, 2016. — 302 с. — (Среднее профессиональное образование).

ISBN 978-5-406-05127-6

DOI 10.15216/978-5-406-05127-6

Охватывает все разделы курса физики средней школы и содержит справочный материал, с помощью которого читатель может восстановить в памяти необходимые определения, законы и формулы. Каждая статья представляет собой краткий конспект ответа на соответствующий вопрос курса. Может быть эффективно использовано при подготовке к зачетам и экзаменам, при решении задач, для систематизации знаний по физике.

Соответствует ФГОС СПО 3+.

Для учащихся средних школ, лицеев, техникумов, а также абитуриентов и слушателей подготовительных отделений.

УДК 373.167.1:54(075.32)

ББК 22.3я723

Трофимова Таисия Ивановна

ФИЗИКА ОТ А ДО Я

Сертификат соответствия № РОСС RU.АГ51.Н03820 от 08.09.2015.

Изд. № 10812. Подписано в печать 05.10.2015. Формат 60×90/16.

Гарнитура «SchoolBookС». Печать офсетная.

Усл. печ. л. 19,0. Уч.-изд. л. 18,9. Тираж 500 экз.

ООО «Издательство «КноРус».

117218, г. Москва, ул. Кедрова, д. 14, корп. 2.

Тел.: 8-495-741-46-28.

E-mail: office@knorus.ru <http://www.knorus.ru>

Отпечатано в ООО «Контакт».

107150, г. Москва, проезд Подбельского 4-й, д. 3.

ISBN 978-5-406-05127-6

© Трофимова Т.И., 2016

© ООО «Издательство «КноРус», 2016

СПО**СРЕДНЕЕ
ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ
ОБРАЗОВАНИЕ****Т.И. ТРОФИМОВА**

ФИЗИКА от А до Я

Охватывает все разделы курса физики средней школы и содержит справочный материал, с помощью которого читатель может восстановить в памяти необходимые определения, законы и формулы. Каждая статья представляет собой краткий конспект ответа на соответствующий вопрос курса. Может быть эффективно использовано при подготовке к зачетам и экзаменам, при решении задач, для систематизации знаний по физике.

Соответствует ФГОС СПО 3+.

Для учащихся средних школ, лицеев, техникумов, а также абитуриентов и слушателей подготовительных отделений.

ISBN 978-5-406-05127-6



9 785406 051276