

**Справочные материалы**

Т.И.Трофимова

# **Ф**ИЗИКА

# 10-11

# К Л А С С Ы

Основные понятия

Законы

Формулы



— Справочные материалы —

Т. И. Трофимова

# Физика

10–11

К Л А С С Ы

Москва  
«ОНИКС 21 век»  
«Мир и Образование»  
2004

УДК 53(075.3)(035)

ББК 22.3я2

Т76

**Трофимова Т. И.**

**Т76** Физика: 10—11 кл. / Т. И. Трофимова. — М.: ООО «Издательский дом «ОНИКС 21 век»: ООО «Издательство «Мир и Образование», 2004. — 128 с.: ил. — (Справочные материалы).

ISBN 5-329-00954-5 (ООО «Издательский дом «ОНИКС 21 век»)

ISBN 5-94666-129-9 (ООО «Издательство «Мир и Образование»)

Книга содержит краткие сведения из всех разделов школьного курса физики. Несмотря на небольшой объем пособия, в нем приводятся формулировки всех основных физических законов и понятий, а также формулы, необходимые для решения задач.

Эта книга окажется полезной школьникам и абитуриентам при повторении курса физики и подготовке к Единому государственному экзамену.

УДК 53(075.3)(035)

ББК 22.3я2

---

*Справочное издание*

**Трофимова Таисия Ивановна**

**Физика**

**10—11 классы**

Редактор *Е. С. Гридасова*. Младший редактор *К. А. Каширина*  
Оформление обложки *Л. Д. Андреева*. Техн. редактор *Л. Б. Чуева*

Оригинал-макет подготовлен ООО «Бета-Фрейм»

Подп. в печ. 04.11.2003. Формат 84×108 <sup>1</sup>/<sub>32</sub>. Гарнитура «Школьная».  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 6,72. Тираж 7 000 экз. Заказ № 1556.

Общероссийский классификатор продукции  
ОК-005-93, том 2; 953005 — учебная литература

ООО «Издательский дом «ОНИКС 21 век».

Изд. лиц. ИД № 02795 от 11.09.2000. 105066, Москва, ул. Доброслободская, д. 5а.

Отдел реализации: тел. (095) 310-75-25, 110-02-50

Internet: [www.onyx.ru](http://www.onyx.ru); e-mail: [mail@onyx.ru](mailto:mail@onyx.ru)

ООО «Издательство «Мир и Образование».

Изд. лиц. ИД № 05088 от 18.06.2001. 109193, Москва, ул. 5-я Кожуховская, д. 13, стр. 1.

Тел./факс (095) 120-51-47, 129-09-60. E-mail: [mir-obrazovanie@rambler.ru](mailto:mir-obrazovanie@rambler.ru)

Отпечатано с готовых днапозитивов  
в ОАО «Рыбинский Дом печати»  
152901, г. Рыбинск, ул. Чкалова, 8.

ISBN 5-329-00954-5 (ООО «Издательский дом «ОНИКС 21 век»)

ISBN 5-94666-129-9 (ООО «Издательство «Мир и Образование»)

© Трофимова Т. И., 2004

© ООО «Издательство «Мир и Образование». Оформление обложки, 2004

## Механика

**Механика** — часть физики, которая изучает закономерности механического движения и причины, вызывающие или изменяющие это движение.

**Механическое движение** — это изменение с течением времени взаимного расположения тел или их частей.

**Классическая механика** (Галилея — Ньютона) изучает законы движения макроскопических тел, скорости которых малы по сравнению со скоростью света в вакууме.

### **Разделы классической механики:**

- **кинематика** изучает движение тел, не рассматривая причины, которые это движение обуславливают;
  - **динамика** изучает законы движения тел и причины, которые вызывают или изменяют это движение;
  - **статика** изучает законы равновесия системы тел.
- Если известны законы движения тел, то из них можно установить и законы равновесия.

## Кинематика

**Материальная точка** — тело, обладающее массой, размерами которого в данной задаче можно пренебречь.

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

Движение тела происходит в пространстве и во времени. Поэтому для описания движения материальной точки надо знать, в каких местах пространства эта точка находилась и в какие моменты времени она проходила то или иное положение.

**Тело отсчета** — произвольно выбранное тело, относительно которого определяется положение других (движущихся) тел.

Положение любого движущегося тела определяется по отношению к телу отсчета, поэтому *механическое движение относительно*.

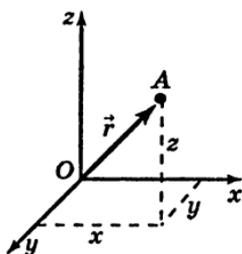


Рис. 1

**Система координат** — система (в простейшем случае прямоугольная декартова система) *Охуз* (рис. 1), *связанная с телом отсчета*.

**Система отсчета** — совокупность тела отсчета, связанной с ним системы координат и синхронизированных между собой часов.

Положение материальной точки *A* в декартовой системе координат определяется тремя координатами  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , а также радиусом-вектором  $\vec{r}$ .

**Траектория** — линия, описываемая движущейся материальной точкой (или телом) относительно выбранной системы отсчета.

В зависимости от формы траектории различают:

- *прямолинейное движение*;
- *криволинейное движение*.

Длина пути  $\Delta s$  — длина участка траектории *AB*, пройденного материальной точкой за данный промежуток времени ( $\Delta s$  — скалярная величина).

**Вектор перемещения**  $\Delta \vec{r}$  — вектор  $\Delta \vec{r} = \vec{r} - \vec{r}_0$ , проведенный из начального положения движущейся точки в положение ее в данный момент времени (рис. 2).

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

Единица скорости: метр в секунду (м/с).

**Мгновенная скорость** — векторная величина, равная пределу отношения вектора перемещения  $\Delta\vec{r}$  к промежутку времени  $\Delta t$ :

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t};$$

вектор  $\vec{v}$  направлен по касательной к траектории в сторону движения (рис. 2).

⇒ Модуль мгновенной скорости

$$v = |\vec{v}| = \left| \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t} \right| = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{|\Delta\vec{r}|}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t},$$

где  $\Delta\vec{r}$  — элементарное перемещение точки за промежуток времени  $\Delta t$ ;  $\vec{r}$  — радиус-вектор точки;  $\Delta s$  — путь, пройденный точкой за промежуток времени  $\Delta t$ .

**Средняя скорость** движущейся точки за промежуток времени  $\Delta t$  — векторная величина, равная отношению перемещения к промежутку времени, в течение которого это перемещение произошло:

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

Направление вектора средней скорости совпадает с направлением  $\Delta\vec{r}$  (см. рис. 2).

⇒ Модуль средней скорости

$$\langle v \rangle = \frac{\Delta s}{\Delta t},$$

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

При движении в одной плоскости вектор  $\vec{v}$  может быть выражен в виде суммы векторов  $\vec{v}_x$  и  $\vec{v}_y$ , направленных вдоль координатных осей (рис. 3):

$$\vec{v} = \vec{v}_x + \vec{v}_y,$$

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2},$$

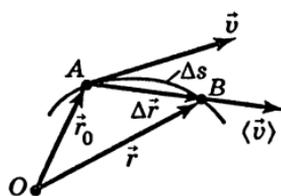


Рис. 2

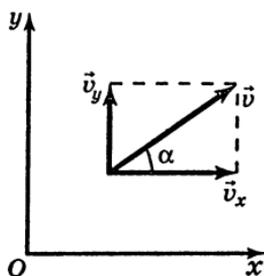


Рис. 3

$$v_x = v \cos \alpha; \quad v_y = v \sin \alpha,$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{v_y}{v_x}.$$

**Ускорение** — характеристика неравномерного движения. Определяет быстроту изменения скорости по модулю и направлению.

Единица ускорения: метр на секунду в квадрате ( $\text{м/с}^2$ ).

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

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

**Мгновенное ускорение** — векторная величина, равная пределу отношения изменения скорости  $\Delta \vec{v}$  к промежутку времени  $\Delta t$ , или первой производной скорости по времени:

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

**Составляющие ускорения:**

- **тангенциальная** — характеризует быстроту изменения скорости *по модулю* (направлена по касательной к траектории (рис. 4)):

$$a_\tau = \frac{dv}{dt};$$

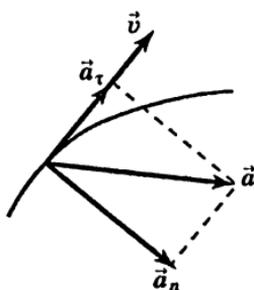


Рис. 4

- **нормальная** — характеризует быстроту изменения скорости *по направлению* (направлена к центру кривизны траектории (рис. 4)):

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

где  $r$  — радиус кривизны траектории в данной точке.

⇒ Полное ускорение при криволинейном движении:

$$\vec{a} = \vec{a}_\tau + \vec{a}_n,$$

$$a = \sqrt{a_\tau^2 + a_n^2}.$$

**Равномерное движение** — движение, при котором материальная точка (тело) за любые равные промежутки времени совершает равные перемещения.

⇒ **Скорость равномерного движения**

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

Вектор скорости совпадает по направлению с вектором перемещения.

**Равномерное прямолинейное движение** — движение с постоянной и по модулю, и по направлению скоростью  $\vec{v} = \text{const}$ .

Вектор скорости  $\vec{v}$  направлен вдоль траектории.

График зависимости скорости от времени дан на рис. 5.

*В случае равномерного прямолинейного движения*

$$\langle \vec{v} \rangle = \vec{v}.$$

Если движение происходит вдоль оси  $x$ , то проекция вектора перемещения на ось равна  $x - x_0 = v_x t$  и уравнение движения примет вид

$$x = x_0 + v_x t,$$

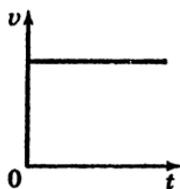


Рис. 5

где  $x_0$  — координата тела в начальный момент времени,  $v_x$  — проекция вектора скорости  $\vec{v}$  на ось  $x$ ,  $t$  — время движения тела.

Кинематическое уравнение равномерного движения материальной точки вдоль оси  $x$

$$x = x_0 + v_x t$$

— решение основной задачи кинематики.

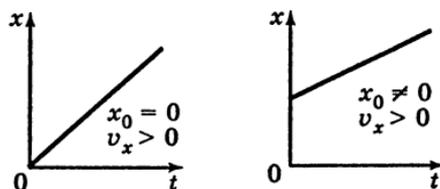


Рис. 6

Графики зависимости координаты тела от времени представлены на рис. 6.

Пройденный телом путь за промежуток времени от  $t_1$  до  $t_2$  определяется площадью фигуры, ограниченной графиком зависимости  $v(t)$  и прямыми  $t = t_1$  и  $t = t_2$  (в случае равномерного движения определяется площадью заштрихованного прямоугольника; рис. 7).

**Равнопеременное прямолинейное движение** — движение, при котором скорость материальной точки (тела) за любые равные промежутки времени изменяется на равные величины.

За промежуток времени  $\Delta t = t - t_0$  изменение скорости  $\Delta v = v - v_0$ :

$$\Delta \vec{v} = \vec{a} \Delta t$$

или

$$\vec{v} - \vec{v}_0 = \vec{a}(t - t_0).$$

При  $t_0 = 0$   $\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t$ , т. е. это *движение с постоянным* по модулю и направлению *ускорением*  $\vec{a} = \text{const}$ .

Вектор ускорения  $\vec{a}$  направлен вдоль траектории точки.

**Равноускоренное прямолинейное движение** — движение, при котором направление вектора ускорения  $\vec{a}$  совпадает с направлением вектора скорости  $\vec{v}$  точки.

Модуль скорости в данном случае с течением времени возрастает.

⇒ Проекция вектора скорости на ось  $x$

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

График зависимости проекции вектора скорости на ось  $x$  от времени дан на рис. 8.

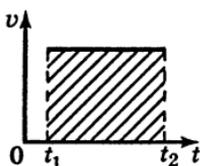


Рис. 7

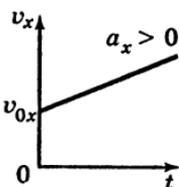


Рис. 8

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

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

### Равноускоренное прямолинейное движение

- ⇒ Скорость

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

где  $\vec{v}_0$  — начальная скорость (в момент времени  $t_0 = 0$ ),  $\vec{a}$  — ускорение,  $\vec{v}$  — скорость в произвольный момент времени  $t$ .

- ⇒ Проекция скорости на ось  $x$

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

При движении в положительном направлении оси  $x$

$$v = v_x; \quad v_0 = v_{0x}; \quad |a_x| = a.$$

- ⇒ Координата

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

### Частные случаи:

- 1) движение без начальной скорости ( $v_0 = 0$ ) из начала координат ( $x_0 = 0$ )

$$v = at; \quad x = \frac{at^2}{2}; \quad x = \frac{v^2}{2a};$$

- 2) движение с начальной скоростью ( $v_0 \neq 0$ ) из начала координат ( $x_0 = 0$ )

$$v = v_0 + at; \quad x = v_0 t + \frac{a_x t^2}{2}; \quad x = \frac{v^2 - v_0^2}{2a}.$$

**Свободное падение** — равноускоренное движение тела без начальной скорости под действием силы тяжести.

При рассмотрении свободного падения сопротивление воздуха не учитывается.

- ⇒ Ускорение этого движения — ускорение свободного падения  $g$  (направлено вертикально вниз);  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ .

⇒ Скорость тела в произвольный момент времени  $t$

$$\vec{v} = \vec{g}t.$$

⇒ Начальная скорость падения  $\vec{v}_0 = 0$ .

⇒ Путь  $h$ , пройденный телом в свободном падении при  $\vec{v}_0 = 0$ ,

$$h = \frac{gt^2}{2}.$$

⇒ Модуль скорости тела при свободном падении с высоты  $h$  при  $v_0 = 0$

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

⇒ Время свободного падения с высоты  $h$  при  $v_0 = 0$

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}}.$$

**Равномерное движение материальной точки по окружности** — движение, при котором материальная точка (тело) за равные промежутки времени проходит равные по длине дуги окружности.

Равномерное движение по окружности — частный случай криволинейного движения. Это движение с *ускорением*, хотя оно происходит с *постоянной по модулю скоростью*.

В любой точке траектории вектор линейной скорости  $\vec{v}$  направлен по касательной, модуль скорости материальной точки с течением времени не изменяется:  $v = \text{const}$  (рис. 9).

⇒ **Угловая скорость**

$$\omega = \frac{\varphi}{t},$$

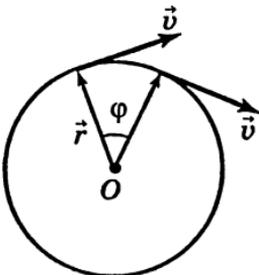


Рис. 9

где  $\varphi$  — угол поворота произвольного радиуса-вектора  $\vec{r}$  от начального положения,  $t$  — время, за которое произошел этот поворот.

При равномерном движении материальной точки по окружности  $\omega = \text{const}$ .

Единица угловой скорости: радиан в секунду (рад/с).

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

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

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

Единица частоты: секунда в минус первой степени ( $\text{с}^{-1} = 1/\text{с}$ ).

• *Тангенциальная составляющая* ускорения при равномерном движении точки по окружности равна нулю:

$$a_\tau = 0.$$

• *Нормальная составляющая* ускорения (*центростремительное ускорение*)

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

В любой точке окружности вектор нормального ускорения  $\vec{a}_n$  перпендикулярен вектору скорости  $\vec{v}$  и направлен по радиусу к центру окружности (рис. 10).

Ускорение материальной точки, равномерно движущейся по окружности в любой ее точке, центростремительное.

⇒ Связь между приведенными выше величинами

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi n, \quad v = \frac{2\pi r}{T} = \omega r,$$

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

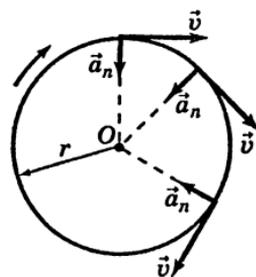


Рис. 10

## Динамика

### Законы Ньютона. Масса. Сила

#### *Первый закон Ньютона*

*Материальная точка (тело) сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения до тех пор, пока воздействие со стороны других тел не заставит ее изменить это состояние.*

Первый закон Ньютона утверждает существование **инерциальных систем отсчета**: систем отсчета, относительно которых поступательно движущиеся тела сохраняют свою скорость постоянной, если на них не действуют другие тела (или действие других тел компенсируется).

**Инерциальная система отсчета** — система отсчета, относительно которой свободная материальная точка, не подверженная воздействию других тел, движется равномерно и прямолинейно, или, как говорят, по инерции.

**Инертность тел** — свойство, присущее всем телам и заключающееся в том, что тела оказывают сопротивление изменению их скорости (как по модулю, так и по направлению).

**Масса тела** — физическая величина, являющаяся мерой его инерционных (*инертная масса*) и гравитационных (*гравитационная масса*) свойств.

Единица массы: килограмм (кг).

В настоящее время можно считать доказанным, что инертная и гравитационная массы равны друг другу (с точностью, не меньшей  $10^{-12}$  их значения).

**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).

*В каждый момент времени сила характеризуется числовым значением, направлением в пространстве и точкой приложения.*

### Второй закон Ньютона

Ускорение, приобретаемое материальной точкой (телом), пропорционально вызывающей его силе, совпадает с ней по направлению и обратно пропорционально массе материальной точки (тела):

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

или

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

Второй закон Ньютон справедлив только в инерциальных системах отсчета.

**Импульс материальной точки** — векторная величина, равная произведению массы материальной точки на ее скорость и имеющая направление вектора скорости:

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

Единица импульса: килограмм-метр в секунду (кг · м/с).

### Третий закон Ньютона

Всякое действие материальных точек (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:

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

Эти силы приложены к разным материальным точкам (телам), всегда действуют парами и являются силами одной природы.

## Закон сохранения импульса.

### Центр масс

**Механическая система** — совокупность материальных точек (тел), рассматриваемых как единое целое.

В механической системе силы подразделяются на внутренние и внешние.

**Внутренние силы** — силы взаимодействия между материальными точками механической системы.

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

**Замкнутая (изолированная) система** — механическая система тел, на которую не действуют внешние силы.

Если на материальную точку одновременно действует несколько сил, то их можно заменить равнодействующей силой, равной геометрической сумме этих сил:

$$\vec{F} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i.$$

Примеры определения равнодействующей силы представлены на рис. 11.

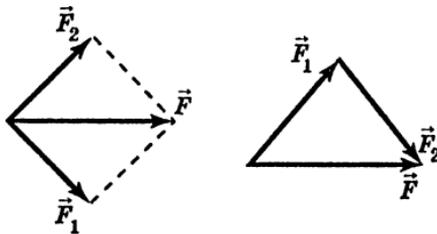


Рис. 11

### **Закон сохранения импульса**

*В замкнутой системе геометрическая сумма импульсов тел остается постоянной при любых взаимодействиях тел этой системы между собой:*

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

где  $m_1, m_2$  — масса тел,  $v_1, v_2$  и  $v'_1, v'_2$  — соответственно скорости тел до и после взаимодействия.

### **Более общая формулировка закона сохранения импульса**

*Импульс замкнутой системы сохраняется, т. е. не изменяется с течением времени:*

$$\vec{p} = \sum_{i=1}^n m_i \vec{v}_i = \text{const},$$

где  $n$  — число материальных точек, входящих в систему.

Центр масс тела — точка, через которую должна проходить линия действия силы, чтобы тело двигалось поступательно.

Масса системы:

$$m = \sum_{i=1}^n m_i.$$

## Силы в механике

**Силы трения** — тангенциальные силы, возникающие при соприкосновении поверхностей тел и препятствующие их относительному перемещению.

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

**Трение:**

- **внешнее (сухое)** — трение, возникающее в плоскости касания двух соприкасающихся тел при их относительном перемещении.
- **внутреннее** — трение между частями одного и того же тела, например, между разными слоями жидкости или газа, скорости которых меняются от слоя к слою.

**Трение покоя** — трение при отсутствии относительного перемещения соприкасающихся тел.

**Сила трения покоя** — сила трения, препятствующая возникновению движения одного тела по поверхности другого.

Относительное движение тел возникает, если внешняя сила  $F > (F_{\text{тр0}})_{\text{max}}$ , где  $(F_{\text{тр0}})_{\text{max}}$  — **предельная сила трения покоя** (рис. 12):

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

где  $\mu_0$  — коэффициент трения покоя;  $N$  — сила нормального давления.

**Трение скольжения** — трение при относительном перемещении соприкасающихся тел.

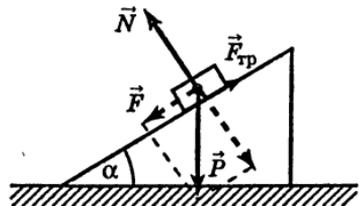


Рис. 12

Сила трения скольжения  $F_{\text{тр}}$  пропорциональна силе  $N$  нормального давления, с которой одно тело действует на другое:

$$F_{\text{тр}} = \mu N,$$

где  $\mu$  — коэффициент трения скольжения, зависящий от свойств соприкасающихся поверхностей.

Коэффициенты  $\mu$ ,  $\mu_0$  — безразмерные.

### *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  $r^2$ .*

Силы тяготения всегда являются силами притяжения и направлены вдоль прямой, проходящей через взаимодействующие тела:

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

где  $G$  — гравитационная постоянная, равная

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

т. е. два точечных тела массой по 1 кг каждое, находящиеся на расстоянии 1 м друг от друга, притягиваются с силой  $6,67 \cdot 10^{-11}$  Н.

Сила тяжести — сила, действующая на любое тело, находящееся вблизи земной поверхности, и направленная вертикально вниз:

$$\vec{F}_{\text{тяж}} = m\vec{g},$$

где  $m$  — масса тела;  $\vec{g}$  — ускорение свободного падения.

Вес тела — сила, с которой тело вследствие тяготения к Земле действует на опору (или подвес), удерживающую тело от свободного падения.

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

$$\vec{N} + \vec{P} = m\vec{a}.$$

Тогда вес тела

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

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 в любом направлении, то  $\vec{a} = \vec{g}$  и  $\vec{P} = 0$ , т. е. тело будет невесомым.

**Невесомость** — состояние, при котором тело движется только под действием силы 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. В расчетах принимают  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ .

**Первая космическая (круговая) скорость**  $v_1$  — минимальная скорость, которую надо сообщить телу, чтобы оно могло двигаться вокруг Земли по круговой орбите, т. е. превратиться в искусственный спутник Земли.

По второму закону Ньютона

$$\frac{GMm}{r^2} = \frac{mv_1^2}{r}.$$

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

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

## Энергия, работа, мощность

**Энергия** — универсальная мера различных форм движения и взаимодействия.

Единица энергии: джоуль (Дж).

**Работа силы** — количественная характеристика процесса обмена энергией между взаимодействующими телами.

Единица работы: джоуль (Дж).

Если тело движется прямолинейно и на него действует постоянная сила  $\vec{F}$ , которая составляет некоторый угол  $\alpha$  с направлением перемещения, то работа этой силы

$$A = F_s s = F s \cos \alpha,$$

где  $F_s$  — проекция силы на направление перемещения.

При  $\alpha < \pi/2$  работа силы положительна, при  $\alpha > \pi/2$  работа силы отрицательна. При  $\alpha = \pi/2$  (сила направлена перпендикулярно перемещению) работа силы равна нулю.

*Работа — скалярная величина.*

**Мощность** — физическая величина, характеризующая скорость совершения работы:

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

Единица мощности: ватт (Вт).

*Мощность — скалярная величина.*

## Кинетическая энергия

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

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

Единица энергии: джоуль (Дж).

**Кинетическая энергия механической системы** — энергия механического движения этой системы.

*Теорема о кинетической энергии*

**Работа равнодействующей сил, приложенных к телу, равна изменению кинетической энергии тела:**

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

Приращение кинетической энергии частицы на элементарном перемещении равно элементарной работе на том же перемещении:

$$\Delta E_k = \Delta A.$$

Приращение кинетической энергии частицы на некотором перемещении равно работе всех сил, действующих на частицу на том же перемещении:

$$E_{k2} - E_{k1} = A_{12}.$$

Кинетическая энергия всегда положительна.

Кинетическая энергия неодинакова в разных инерциальных системах отсчета.

## Потенциальная энергия

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

Единица энергии: джоуль (Дж).

Потенциальная энергия определяется с точностью до некоторой произвольной постоянной. 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.

Работа консервативных сил при бесконечно малом изменении конфигурации системы равна приращению потенциальной энергии, взятому со знаком минус, т. к. работа совершается за счет убыли потенциальной энергии:

$$\Delta A = -\Delta E_p.$$

Потенциальное поле — поле, в котором работа, совершаемая 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.

Примеры: 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 (не зависит от траектории перемещения).

## Работа силы тяжести

⇒ Работа силы тяжести при свободном падении тела с высоты  $h_1$  (начало отсчета) до высоты  $h_2$ :

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

где  $m$  — масса тела;  $g$  — ускорение свободного падения.

Работа силы тяжести зависит только от начального и конечного положений тела, т. е. поле тяготения *потенциально*.

Работа силы тяжести по замкнутой траектории равна нулю.

⇒ Потенциальная энергия тела, поднятого на высоту  $h$ ,

$$E_p = mgh.$$

## Работа силы упругости

Работа силы упругости *пружинь*:

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

где  $k$  — жесткость пружины,  $x_1$  и  $x_2$  — координаты начального и конечного положений пружины.

Работа силы упругости определяется только начальной и конечной координатами, т. е. поле упругих сил *потенциально*.

Работа силы упругости по замкнутой траектории равна нулю.

⇒ Потенциальная энергия упругодеформированного тела:

$$E_p = \frac{kx^2}{2}.$$

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

## Закон сохранения полной механической энергии

Полная механическая энергия системы — энергия механического движения и взаимодействия (равна сумме кинетической и потенциальной энергий):

$$E = E_k + E_p.$$

Если тела замкнутой системы взаимодействуют друг с другом посредством сил тяжести или сил упругости, то

$$A = -(E_{p2} - E_{p1}) \quad \text{и} \quad A = E_{k2} - E_{k1},$$

откуда

$$E_{k2} - E_{k1} = -(E_{p2} - E_{p1}),$$

где  $E_{k1}$ ,  $E_{k2}$ ,  $E_{p1}$ ,  $E_{p2}$  — соответственно общая кинетическая энергия системы тел в два разных момента времени и потенциальная энергия системы тел в те же моменты времени. Следовательно,

$$E_{k1} + E_{p1} = E_{k2} + E_{p2}.$$

### *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.*

**Консервативная система** — механическая система, на тела которой действуют только консервативные силы.

### *Более общая формулировка закона сохранения механической энергии*

*В системе тел, между которыми действуют только консервативные силы, полная механическая энергия сохраняется, т. е. не изменяется со временем:*

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

В консервативных системах полная механическая энергия сохраняется, т. е. не изменяется со временем.

В консервативных системах полная механическая энергия остается постоянной. 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, выражающий и *качественную* сторону взаимного превращения различных форм движения друг в друга. Закон сохранения и превращения энергии — *фундаментальный закон природы*.

### Механика жидкостей

**Плотность** — физическая величина, равная отношению массы тела к его объему:

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

где  $m$  — масса тела,  $V$  — его объем.

Единица плотности: килограмм на кубический метр ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ).

**Давление жидкости** — физическая величина, равная по модулю нормальной силе, действующей со стороны жидкости на единицу площади:

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

Единица давления: паскаль (Па).

Если в покоящуюся жидкость поместить тонкую пластинку, то части жидкости, находящиеся по разные стороны от нее, будут действовать на каждый ее элемент  $\Delta S$  с силами  $\Delta \vec{F}$ , которые независимо от того, как пластинка ориентирована, будут равны по модулю и направлены перпендикулярно площадке  $\Delta S$  (рис. 13).

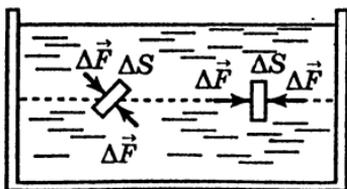


Рис. 13

### **Закон Паскаля**

Давление в любом месте покоящейся жидкости одинаково по всем направлениям, причем давление одинаково передается по всему объему, занятому покоящейся жидкостью.

### **Закон Архимеда**

На тело, погруженное в жидкость (газ), действует со стороны этой жидкости направленная вверх выталкивающая сила, равная весу вытесненной телом жидкости (газа):

$$F_A = \rho g V,$$

где  $\rho$  — плотность жидкости;  $V$  — объем погруженной в жидкость части тела.

⇒ Давление жидкости

$$p = \frac{P}{S} = \frac{\rho g S h}{S} = \rho g h,$$

где  $S$  — поперечное сечение столба жидкости,  $h$  — его высота,  $\rho$  — плотность,  $P = \rho g S h$  — вес. Давление изменяется линейно с высотой. Давление  $\rho g h$  называется гидростатическим давлением.

### **Закон (принцип) Бернулли**

Давление жидкости, текущей в трубе, больше в тех частях трубы, где скорость ее движения меньше, и наоборот, в тех частях, где скорость больше, давление меньше.

⇒ Уравнение Бернулли для стационарного течения идеальной несжимаемой жидкости

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

где  $p$  — статическое давление жидкости для определенного сечения трубки тока;  $v$  — скорость жидкости для этого же сечения;  $\rho v^2/2$  — динамическое давление

жидкости для этого же сечения;  $h$  — высота, на которой расположено сечение;  $\rho gh$  — гидростатическое давление.

*Уравнение Бернулли — закон сохранения механической энергии применительно к установившемуся течению идеальной жидкости (уравнение выводится из закона сохранения энергии).*

**Гидростатическое давление** — давление, обусловленное силой тяжести и зависящее от глубины под поверхностью жидкости:

$$p = \rho gh,$$

где  $\rho$  — плотность жидкости;  $h$  — глубина столба жидкости.

⇒ **Уравнение Бернулли для горизонтальной трубки тока** ( $h_1 = h_2$ )

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

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

## Элементы специальной теории относительности

Специальная теория относительности (СТО) — *физическое учение о пространстве и времени*. Физическое потому, что свойства пространства и времени рассматриваются в связи с законами совершающихся в них физических явлений.

### *Первый постулат Эйнштейна (принцип относительности)*

|| Все законы природы инвариантны (неизменны) по отношению к переходу от одной инерциальной системы отсчета к другой.

**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.

**Длина тел в разных системах отсчета**

Если в системе отсчета  $K$ , относительно которой стержень покоится, его длина  $l_0$  (стержень расположен вдоль оси  $x$ ), то в системе  $K'$ , относительно которой стержень движется со скоростью  $v$ , его длина

$$l = l_0 \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

(лоренцево сокращение длины).

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

**Длительность событий  
в разных системах отсчета**

Если в системе отсчета  $K$  интервал времени между двумя событиями, происходящими в одной и той же точке, равен  $\tau_0$ , то интервал времени между этими событиями в системе  $K'$  (она движется относительно системы  $K$  со скоростью  $v$ )

$$\tau = \tau_0 \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

(релятивистское замедление времени).

Длительность события, происходящего в некоторой точке, наименьшая в той инерциальной системе отсчета, относительно которой эта система неподвижна.

### Молекулярно-кинетическая теория

Макроскопические процессы в телах, связанные с огромным числом содержащихся в телах атомов и молекул, изучают:

- *молекулярная физика* — раздел физики, в котором изучаются строение и свойства вещества исходя из молекулярно-кинетических представлений, основывающихся на том, что все тела состоят из молекул, находящихся в непрерывном хаотическом движении;
- *термодинамика* — раздел физики, в котором изучаются общие свойства макроскопических систем, находящихся в состоянии термодинамического равновесия, и процессы перехода между этими состояниями.

Эти разделы физики взаимно дополняют друг друга, отличаясь разными 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 выбирают температуру, давление и объем.

**Термодинамический процесс** — любое изменение в термодинамической системе, связанное с изменением хотя бы одного из ее термодинамических параметров.

**Температура** — физическая величина, характеризующая состояние термодинамического равновесия макроскопической системы и определяющая направление теплообмена между телами.

**Международная практическая шкала** градуируется в градусах Цельсия ( $0^\circ\text{C}$ ).

Температура замерзания и кипения воды при давлении  $1,013 \cdot 10^5$  Па соответственно  $0$  и  $100^\circ\text{C}$  (*реперные точки*).

**Термодинамическая температурная шкала** градуируется в кельвинах (К).

Определяется по одной *реперной точке*, в качестве которой взята *тройная точка воды* (температура, при которой лед, вода и насыщенный пар при давлении  $609$  Па находятся в термодинамическом равновесии). Температура этой точки по данной шкале равна  $273,16$  К (точно).

Температура  $T = 0$  К называется *нулем Кельвина*.

В термодинамической шкале температура замерзания воды равна  $273,15$  К (при том же давлении, что и в Международной практической шкале):

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

**Атом** — наименьшая часть химического элемента, являющаяся носителем его свойств.

**Молекула** — наименьшая устойчивая частица вещества, обладающая его основными химическими свойствами и состоящая из атомов, соединенных между собой химическими связями.

**Количество вещества**  $\nu$  — физическая величина, определяемая числом специфических структурных элементов — молекул, атомов или ионов, из которых состоит вещество.

Единица количества вещества: моль (моль).

**Молярная масса** — масса  $1$  моль вещества. Она равна

$$M = m_0 N_A,$$

где  $m_0$  — масса молекулы;  $N_A$  — постоянная Авогадро.

Единица молярной массы: кг/моль.

**Постоянная Авогадро** — число атомов (молекул или других структурных единиц), содержащихся в 1 моль различных веществ:

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

**Молярный объем**  $V_m$  — физическая величина, равная отношению объема однородной системы к количеству вещества системы.

Единица молярного объема: м<sup>3</sup>/моль.

## **Основные положения молекулярно-кинетической теории**

**Представления, лежащие в основе молекулярно-кинетической теории (МКТ)**

1. Все тела состоят из молекул (атомов).
2. Молекулы находятся в непрерывном хаотическом движении, в результате которого они имеют самые разные скорости.
3. Между молекулами (атомами) существуют силы взаимодействия — силы притяжения и отталкивания.

**Некоторые опыты, подтверждающие основные положения МКТ**

- **Диффузия**

Взаимное проникновение молекул одного вещества в межмолекулярные промежутки другого вещества (наблюдается в газах, жидкостях и твердых телах; свидетельствует о движении молекул).

- **Броуновское движение**

Любые частицы малых размеров ( $\approx 1$  мкм), взвешенные в газе или жидкости совершают сложное зигзагообразное движение. Это движение называется **броуновским**. Броуновское движение взвешенных частиц вызывается ударами молекул среды, в которой частицы взвешены. Броуновское движение является подтверждением выводов молекулярно-кинетической теории о хаотическом тепловом движении атомов и молекул.

## Опытные законы для идеального газа

**Идеальный газ** — идеализированная модель, согласно которой считают, что:

1) собственный объем молекул газа пренебрежительно мал по сравнению с объемом сосуда;

2) между молекулами отсутствуют силы взаимодействия;

3) столкновения молекул газа между собой и со стенками сосуда абсолютно упругие.

Модель идеального газа можно использовать при изучении реальных газов, поскольку они в условиях, близких к нормальным (например, кислород и гелий), а также при низком давлении и высокой температуре близки по своим свойствам к идеальному газу. Кроме того, внося поправки, учитывающие собственный объем молекул газа и действующие молекулярные силы, можно перейти к теории реальных газов.

### *Закон Бойля—Мариотта*

|| Для данной массы газа при постоянной температуре произведение давления газа на его объем есть величина постоянная:

$$pV = \text{const} \quad (T = \text{const}; \quad m = \text{const}),$$

где  $p$  — давление газа,  $V$  — его объем,  $T$  — термодинамическая температура,  $m$  — масса газа.

### *Закон Гей-Люссака*

|| Объем данной массы газа при постоянном давлении изменяется линейно с температурой:

$$V = V_0(1 + \alpha t) \quad (1)$$

$$(p = \text{const}; \quad m = \text{const}).$$

### *Закон Шарля*

|| Давление данной массы газа при постоянном объеме изменяется линейно с температурой:

$$p = p_0(1 + \alpha t) \quad (2)$$

$$(V = \text{const}; \quad m = \text{const}).$$

В формулах (1) и (2)  $t$  — температура по шкале Цель-

сия,  $V_0$  и  $p_0$  — соответственно объем и давление газа при  $0^\circ\text{C}$ , коэффициент  $\alpha = \frac{1}{273} \text{ K}^{-1}$ .

### Закон Авогадро

Моль любых газов при одинаковых температуре и давлении занимает одинаковый объем.

При нормальных условиях этот объем:

$$V_m = 22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 / \text{ моль}.$$

### Закон Дальтона

Давление смеси идеальных газов равно сумме парциальных давлений входящих в нее газов:

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

где  $p_1, p_2, \dots, p_n$  — парциальные давления.

**Парциальное давление** — давление, которое оказывали бы газы смеси, если бы они занимали объем, равный объему смеси при той же температуре.

**Изопроцессы** — процессы, при которых один из термодинамических параметров состояния газа сохраняется постоянным.

График зависимости между параметрами состояния газа при условиях:

- $T = \text{const}$  — *изотерма* (рис. 14);
- $p = \text{const}$  — *изобара* (рис. 15);
- $V = \text{const}$  — *изохора* (рис. 16).

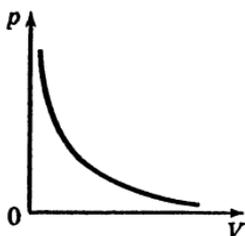


Рис. 14

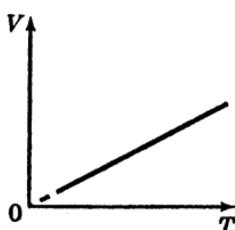


Рис. 15

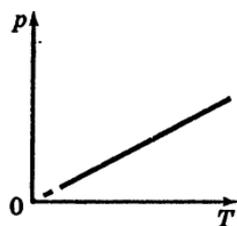


Рис. 16

## Уравнение состояния идеального газа

Уравнение состояния газа — уравнение, связывающее параметры состояния газа.

⇒ Уравнение Менделеева — Клапейрона (уравнение состояния) для 1 моль идеального газа

$$pV_m = RT,$$

где  $p$ ,  $V_m$ ,  $T$  — соответственно давление, молярный объем и термодинамическая температура газа;  $R$  — молярная газовая постоянная.

Молярная газовая постоянная определяется из формулы  $pV_m = RT$  (моль газа находится при нормальных условиях:  $p_0 = 1,013 \cdot 10^5$  Па,  $T_0 = 273,15$  К,  $V_m = 22,41 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>/моль):

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

### Постоянная Больцмана

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

Из уравнения состояния  $pV_m = RT$  с учетом постоянной Больцмана

$$p = \frac{RT}{V_m} = \frac{kN_A T}{V_m} = nkT.$$

⇒ Уравнение состояния идеального газа

$$p = nkT,$$

где  $n$  — концентрация молекул (число молекул в 1 м<sup>3</sup> газа).

⇒ Уравнение Клапейрона—Менделеева (уравнение состояния) для произвольной массы газа

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

где  $p$ ,  $V$ ,  $T$  — соответственно давление, объем и термодинамическая температура газа,  $m$  — масса газа,  $M$  — его молярная масса,  $\nu = m/M$  — количество вещества.

## Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеальных газов

⇒ Основное уравнение молекулярно-кинетической теории

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

где  $p$  — давление газа,  $n$  — концентрация молекул,  $m_0$  — масса одной молекулы,  $\langle v_{\text{кв}} \rangle^2$  — средняя квадратичная скорость молекул;

$$\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i^2}$$

(считается, что в объеме  $V$  имеется  $N$  молекул, движущихся со скоростями  $v_1, v_2, \dots, v_N$ ).

Учитывая, что  $n = N/V$ , получаем

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

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

где  $E$  — суммарная кинетическая энергия поступательного движения всех молекул газа.

Масса газа  $m = N m_0$ :

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

Для одного моля газа  $m = M$  ( $M$  — молярная масса), тогда основное уравнение молекулярно-кинетической теории:

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

где  $V_m$  — молярный объем.

По уравнению Менделеева—Клапейрона

$$pV_m = RT, \quad RT = \frac{1}{3} M \langle v_{\text{кв}} \rangle^2.$$

Средняя квадратичная скорость

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

где  $k = R/N_A$  — постоянная Больцмана.

⇒ Средняя кинетическая энергия поступательного движения одной молекулы идеального газа

$$\langle \varepsilon_0 \rangle = \frac{m_0 \langle v_{\text{кв}} \rangle^2}{2} = \frac{3}{2} kT.$$

*Термодинамическая температура — мера средней кинетической энергии поступательного движения молекул идеального газа.*

### Свойства паров, жидкостей и твердых тел

**Парообразование** — процесс перехода вещества из жидкого состояния в газообразное.

**Испарение** — парообразование, происходящее при любой температуре со свободной поверхности жидкости.

**Конденсация** — переход вещества вследствие его охлаждения или сжатия из газообразного состояния в конденсированное (жидкое или твердое). Конденсация — процесс, компенсирующий испарение.

**Кипение** — парообразование 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.

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

**Фаза** — термодинамически равновесное состояние вещества, отличающееся по физическим свойствам от других возможных равновесных состояний того же вещества.

**Фазовый переход** — переход вещества 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).

### Насыщенный пар. Влажность воздуха

**Насыщенный пар** — газ, находящийся в состоянии термодинамического равновесия со своей жидкостью.

Давление насыщенного пара зависит только от его химического состава и температуры.

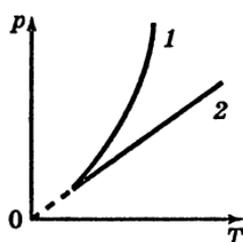


Рис. 17

На рис. 17 представлена зависимость давления для насыщенного пара (кривая 1) и для идеального газа (кривая 2) от температуры при постоянном объеме.

Давление насыщенного пара повышается с повышением температуры.

**Ненасыщенный пар** — пар, для которого при данной температуре его давление меньше давления насыщенного пара ( $p < p_H$ ).

**Абсолютная влажность** — масса водяных паров, содержащихся в  $1 \text{ м}^3$  воздуха при данных условиях.

**Точка росы** — температура, при которой находящийся в воздухе водяной пар становится насыщенным.

**Относительная влажность** — выраженное в процентах отношение парциального давления  $p$  водяного пара, содержащегося в воздухе при данной температуре, к давлению  $p_H$  насыщенного пара при той же температуре:

$$\varphi = \frac{p}{p_H} \cdot 100\%.$$

## Смачивание. Капиллярные явления

**Смачивание** — явление искривления свободной поверхности жидкости при соприкосновении жидкости с поверхностью твердого тела.

**Мениск** — свободная поверхность жидкости, искривленная вблизи границы ее соприкосновения с твердым телом.

**Краевой угол  $\theta$**  — угол между касательными к поверхности жидкости и твердого тела (рис. 18).



Рис. 18

**Смачивающая жидкость** — жидкость, которая смачивает твердое тело, если краевой угол острый:

$$0 < \theta < \frac{\pi}{2}.$$

Вода смачивает стекло. Силы притяжения между молекулами жидкости и твердого тела здесь больше, чем между молекулами самой жидкости, и жидкость стремится увеличить поверхность соприкосновения с твердым телом.

**Несмачивающая жидкость** — жидкость, которая не смачивает твердое тело, если краевой угол тупой:

$$\frac{\pi}{2} < \theta < \pi.$$

Ртуть не смачивает стекло. Силы притяжения между молекулами жидкости и твердого тела здесь меньше, чем между молекулами жидкости, и жидкость стремится уменьшить поверхность своего соприкосновения с твердым телом.

*Полное смачивание:*  $\theta = 0$ .

*Полное несмачивание:*  $\theta = \pi$ .

**Капилляры** — узкие цилиндрические трубки (их диаметр  $\leq 1$  мм).

**Капиллярные явления** — явления изменения высоты уровня жидкости в капиллярах.

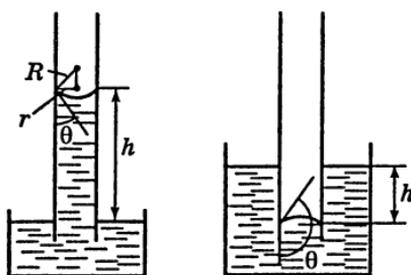


Рис. 19

Если капилляр поместить одним концом в жидкость, в налитую в широкий сосуд, то вследствие смачивания или несмачивания жидкостью стенок капилляра кривизна поверхности жидкости в капилляре становится значительной (рис. 19). Если

жидкость смачивает материал трубки, то внутри нее поверхность жидкости — *мениск* — имеет вогнутую форму, если не смачивает — выпуклую.

Под вогнутой поверхностью жидкости появится 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

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

где  $\rho$  — плотность жидкости;  $r$  — радиус капилляра;  $R$  — радиус кривизны поверхности;  $g$  — ускорение свободного падения.

### Упругие свойства твердых тел

**Деформация** — изменение формы и размеров твердых тел под действием внешних сил.

**Упругая деформация** — деформация, при которой после прекращения действия внешних сил тело принимает первоначальные размеры и форму.

**Пластическая деформация** — деформация, которая сохраняется в теле после прекращения действия внешних сил.

Все виды деформаций (растяжение или сжатие, сдвиг, изгиб, кручение) могут быть сведены к *одновременно происходящим деформациям растяжения или сжатия и сдвига*.

**Относительная деформация**  $\varepsilon$  — количественная мера, характеризующая степень деформации и определяемая отношением абсолютной деформации  $\Delta x$  к величине смещения  $x$  (характеризует первоначальные размеры и форму тела).

⇒ Относительное продольное растяжение (сжатие)

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l},$$

где  $\Delta l$  — изменение длины тела при растяжении (сжатии);  $l$  — длина тела до деформации.

⇒ Относительное поперечное растяжение (сжатие)

$$\varepsilon = \frac{\Delta d}{d},$$

где  $\Delta d$  — изменение диаметра стержня при растяжении (сжатии);  $d$  — диаметр стержня.

**Сила упругости**  $F_{\text{упр}}$  — сила, возникающая при деформации тела и направленная противоположно направлению смещения частиц при деформации.

**Напряжение**  $\sigma$  — физическая величина, определяемая силой упругости, действующей на единицу площади поперечного сечения тела:

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

Напряжение называется *нормальным*, если сила направлена по нормали к поверхности, и *тангенциальным*, если сила направлена по касательной к поверхности.

### Закон Гука

|| Напряжение  $\sigma$  прямо пропорционально относительной деформации  $\varepsilon$ :

$$\sigma = E\varepsilon,$$

где  $E$  — модуль Юнга (определяется напряжением, вызывающим относительное удлинение, равное единице).

Закон Гука выполняется только для упругих деформаций.

Из приведенных формул вытекает, что

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\sigma}{E} = \frac{F}{ES}$$

или

$$F = \frac{ES}{l} \Delta l = k \Delta l.$$

Это выражение также задает *закон Гука*, согласно которому абсолютное удлинение тела при упругой деформации пропорционально действующей на тело силе ( $k$  — коэффициент упругости).

**Внутренняя энергия идеального газа.****Распределение энергии по степеням свободы**

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 относятся* кинетическая энергия движения системы как целого и потенциальная энергия системы во внешних полях.

Число степеней свободы — число независимых переменных, полностью определяющих положение системы в пространстве.

Независимо от числа степеней свободы молекул три степени свободы всегда поступательные и ни одна из них не имеет преимущества перед другими. Поэтому на каждую из них приходится в среднем одинаковая энергия

$$\langle \varepsilon_i \rangle = \frac{\langle \varepsilon_0 \rangle}{3} = \frac{1}{2} kT.$$

⇒ Средняя кинетическая энергия молекулы

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{i}{2} kT,$$

где  $i$  — число степеней свободы молекулы.

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

$$U = NE_k = \nu N_A \frac{3}{2} kT = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT = \frac{3}{2} pV,$$

где  $N$  — число молекул,  $\nu$  — количество вещества,  $N = \nu N_A$  ( $N_A$  — постоянная Авогадро),  $\nu = m/M$  ( $m$  — масса газа,  $M$  — молярная масса),  $k$  — постоянная Больцмана,  $R$  — молярная газовая постоянная ( $R = kN_A$ ). Учтено, что

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

## Первое начало термодинамики

*Первое начало термодинамики* — это закон сохранения и превращения энергии применительно к термодинамическим процессам.

### *Первое начало термодинамики*

*Теплота, сообщенная системе, расходуется на изменение ее внутренней энергии и на совершение системой работы против внешних сил:*

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

*Изменение внутренней энергии системы при переходе ее из одного состояния в другое равно сумме совершенной над системой работы  $A'$  и полученной системой теплоты  $Q$ :*

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

В приведенных формулировках  $A' = -A$ .

Если система *периодически возвращается в первоначальное состояние*, то изменение ее внутренней энергии

$$\Delta U = 0.$$

Тогда, согласно первому началу термодинамики,

$$A = Q.$$

*Одна из формулировок  
первого начала термодинамики*

Вечный двигатель первого рода — периодически действующее устройство, которое совершало бы большую работу, чем сообщенная ему извне энергия, — невозможен.

**Работа газа при изменении его объема**

Если газ, расширяясь, передвигает поршень на расстояние  $\Delta l$  (рис. 20), то производит над ним работу

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

Формула

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

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

Работа при расширении газа положительна ( $\Delta V > 0$ ), работа при сжатии — отрицательна ( $\Delta V < 0$ ).

Изменение давления газа при его расширении задается на рисунке произвольной кривой (рис. 21).

При увеличении объема на  $\Delta V$  совершаемая газом работа равна  $p\Delta V$ , т. е. определяется площадью закрашенной полоски. Полная работа, совершаемая газом при расширении от объема  $V_1$  до объема  $V_2$ , определяет-

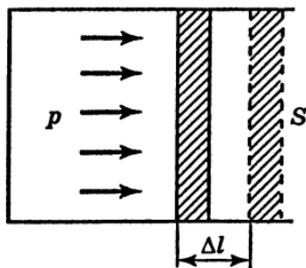


Рис. 20

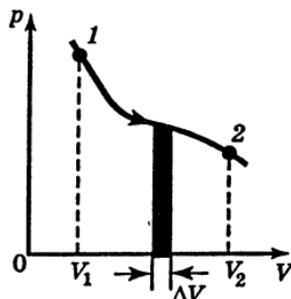


Рис. 21

ся площадью, ограниченной осью абсцисс, кривой  $p(V)$  и прямыми  $V_1$  и  $V_2$ .

### Теплоемкость: удельная и молярная

Теплоемкость — физическая величина, численно равная отношению количества теплоты  $\Delta Q$ , сообщаемого телу, к изменению температуры  $\Delta T$  тела в термодинамическом процессе:

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

Единица теплоемкости: джоуль на кельвин (Дж/К).

Удельная теплоемкость — величина, определяемая количеством теплоты, необходимым для нагревания 1 кг вещества на 1 К:

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

Единица удельной теплоемкости: джоуль на килограмм-кельвин (Дж/(кг · К)).

Молярная теплоемкость — величина, определяемая количеством теплоты, необходимым для нагревания 1 моль вещества на 1 К:

$$C_m = \frac{Q}{\nu\Delta T},$$

где  $\nu$  — количество вещества.

Единица молярной теплоемкости: джоуль на моль-кельвин (Дж/(моль · К)).

⇒ Связь между удельной и молярной теплоемкостями

$$C_m = cM.$$

Различают теплоемкости — удельную и молярную —

**нет страницы**

**нет страницы**

## Уравнение теплового баланса

**Теплообмен** — процесс передачи внутренней энергии без совершения работы.

Если несколько тел с различными температурами привести в соприкосновение, то между ними совершается теплообмен (происходит за счет обмена энергиями хаотически движущихся молекул), в результате которого происходит выравнивание температур тел.

Рассмотрим систему тел, в которой происходит теплообмен. В данном случае

$$A = 0; \quad Q = \Delta U.$$

В процессе теплообмена внутренняя энергия одних тел увеличивается, других тел — уменьшается. Мера этого изменения — количество теплоты, которое данные тела получили или отдали в процессе теплообмена.

В общем случае

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

Если в теплообмене участвуют несколько тел, то алгебраическая сумма количества теплоты, отданного те-

лами  $\sum_{i=1}^n Q_{i \text{ отд}}$ , и количества теплоты, полученного те-

лами  $\sum_{k=1}^n Q_{k \text{ пол}}$ , для замкнутой системы тел равна нулю.

⇒ Уравнение теплового баланса

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

**Расчет изменения внутренней энергии:**

⇒ при нагревании или охлаждении

$$\Delta U = cm \Delta T;$$

⇒ при плавлении или затвердевании

$$\Delta U = \lambda m;$$

⇒ при парообразовании или конденсации

$$\Delta U = rm;$$

⇒ при сгорании вещества

$$\Delta U = qm.$$

В приведенных формулах:

$c$  — удельная теплоемкость тел;

$\lambda$  — удельная теплота плавления;

$r$  — удельная теплота парообразования;

$q$  — удельная теплота сгорания;

$m$  — масса тела;

$\Delta T$  — изменение температуры ( $\Delta T = \theta - T_0$ ;  $\theta$  — конечная температура тела;  $T_0$  — начальная температура тела).

### Адиабатный процесс

**Адиабатный процесс** — процесс, при котором отсутствует теплообмен между системой и окружающей средой:

$$\Delta Q = 0.$$

К адиабатным процессам можно отнести все быстро протекающие процессы. Например, адиабатным процессом можно считать процесс распространения звука в среде.

⇒ Первое начало термодинамики применительно к адиабатному процессу

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

$$Q = 0,$$

$$A = -\Delta U.$$

Внешняя работа совершается за счет изменения внутренней энергии системы.

### Второе начало термодинамики

*Второе начало термодинамики* определяет направление протекания термодинамических процессов, указывая, какие процессы в природе возможны, а какие — нет.

**Формулировки  
второго начала термодинамики**

• *по Клаузиусу*

|| *Невозможен круговой процесс, единственным результатом которого является передача теплоты от менее нагретого тела к более нагретому.*

Чтобы теплота могла перейти от холодного тела к горячему, необходимо совершить механическую работу.

• *по Кельвину*

|| *Невозможен круговой процесс, единственным результатом которого является превращение теплоты, полученной от нагревателя в эквивалентную ей работу.*

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.

• *одна из формулировок второго начала термодинамики*

|| *Вечный двигатель второго рода — периодически действующее устройство, совершающее работу за счет одного источника теплоты, — невозможен.*

## **Теорема Карно. Цикл Карно**

### **Теорема Карно**

|| *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).

**Цикл Карно** — прямой обратимый круговой процесс, состоящий из двух изотерм и двух адиабат (рис. 22).

Рабочее тело — идеальный газ.



Рис. 22

⇒ Термический КПД цикла Карно

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

Электрическое поле**Электрический заряд  
и закон его сохранения**

**Электрический заряд** характеризует способность тел или частиц к электромагнитным взаимодействиям.

Единица электрического заряда: кулон ( $1 \text{ Кл} = 1 \text{ А} \cdot \text{с}$ ).

⇒ **Элементарный электрический заряд**

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}$$

Носителем элементарного отрицательного заряда является *электрон* ( $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$ ); носителем элементарного положительного заряда является *протон* ( $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ ).

**Точечный заряд** — заряд, сосредоточенный на теле, линейные размеры которого пренебрежимо малы по сравнению с расстоянием до других заряженных тел, с которыми он взаимодействует.

**Фундаментальные свойства электрических зарядов**

Существует в двух видах: положительный и отрицательный. Одноименные заряды отталкиваются, разноименные — притягиваются.

Электрический заряд *инвариантен* (его величина не зависит от системы отсчета, т. е. не зависит от того, движется он или покоится).

Электрический заряд *дискретен*, т. е. заряд любого тела составляет целое кратное от элементарного электрического заряда  $e$ .

Электрический заряд *аддитивен* (заряд любой системы тел (частиц) равен сумме зарядов тел (частиц), входящих в систему).

Электрический заряд подчиняется закону сохранения заряда.

### *Закон сохранения заряда*

Алгебраическая сумма электрических зарядов любой замкнутой системы остается неизменной, какие бы процессы не происходили внутри в данной системы.

**Замкнутая система** — система, не обменивающаяся зарядами с внешними телами.

## **Закон Кулона. Электростатическое поле и его напряженность**

### *Закон Кулона*

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, и  $F$  направлена по прямой, соединяющей взаимодействующие заряды.

Эта сила называется кулоновской силой:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|Q_1||Q_2|}{r^2},$$

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \text{ м/Ф},$$

где  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная, относящаяся к числу фундаментальных физических постоянных:

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}.$$

Если взаимодействующие заряды находятся в однородной и изотропной среде, то кулоновская сила

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|Q_1||Q_2|}{\epsilon r^2}.$$

**Диэлектрическая проницаемость среды  $\epsilon$**  — безразмерная величина, 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  $\epsilon = 1$ .

**Электростатическое поле** — поле, создаваемое неподвижными электрическими зарядами.

**Пробный точечный заряд** — такой заряд, который не искажает исследуемое поле (не вызывает перераспределения зарядов, создающих поле).

Используется для обнаружения и опытного исследования электростатического поля.

**Напряженность электростатического поля в данной точке** — физическая величина, определяемая силой, действующей на единичный положительный заряд, помещенный в эту точку поля:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q_0}.$$

Единица напряженности: ньютон на кулон или вольт на метр ( $1 \text{ Н/Кл} = 1 \text{ В/м}$ ).

Напряженность поля точечного заряда в вакууме

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2}.$$

Напряженность — силовая характеристика электростатического поля.

## Принцип суперпозиции. Графическое изображение электростатических полей

### *Принцип суперпозиции (наложения) электростатических полей*

*Напряженность результирующего поля, создаваемого системой зарядов, равна геометрической сумме напряженностей полей, создаваемых в данной точке каждым из зарядов в отдельности:*

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i.$$

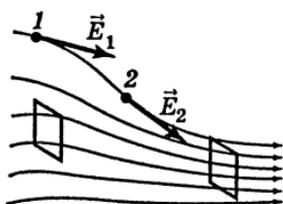


Рис. 23

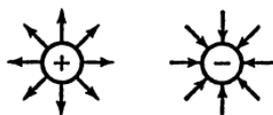


Рис. 24

Линии напряженности (силовые линии) — линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора  $\vec{E}$  (рис. 23).

Линиям напряженности приписывается направление, совпадающее с направлением вектора напряженности.

Чтобы с помощью линий напряженности можно было характеризовать не только направление, но и значение напряженности электростатического поля, их проводят с определенной густо-

той (см. рис. 23): 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. 24).

## Работа сил электростатического поля. Потенциал

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  $Q$ .

Работа сил электростатического поля не зависит от траектории перемещения, а определяется только поло-

жениями начальной 1 и конечной 2 точек. Это означает, что электростатическое поле *потенциально*, а силы электростатического поля — *консервативны*.

### Потенциал электростатического поля

• физическая величина, определяемая потенциальной энергией единичного положительного заряда  $Q_0$ , помещенного в данную точку:

$$\varphi = \frac{W}{Q_0};$$

• физическая величина, определяемая работой по перемещению единичного положительного заряда  $Q_0$  при удалении его из данной точки в бесконечность:

$$\varphi = \frac{A_\infty}{Q_0}.$$

Единица потенциала: вольт ( $1 \text{ В} = 1 \text{ Дж/Кл}$ ).

⇒ Потенциал электростатического поля точечного заряда в вакууме

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r},$$

где  $r$  — расстояние от точки поля до заряда  $Q$ .

### Принцип суперпозиции (наложения) электростатических полей

Если поле создается несколькими зарядами, то потенциал поля системы зарядов равен алгебраической сумме потенциалов полей всех этих зарядов:

$$\varphi = \sum_{i=1}^n \varphi_i.$$

Потенциал — энергетическая характеристика электростатического поля.

## Разность потенциалов. Эквипотенциальные поверхности

Работа сил электростатического поля при перемещении точечного заряда  $Q_0$  из точки 1 в точку 2

$$A_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{QQ_0}{r_1} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{QQ_0}{r_2};$$

$$A_{12} = W_1 - W_2 = Q_0(\varphi_1 - \varphi_2).$$

Работа равна произведению перемещаемого заряда на разность потенциалов в начальной и конечной точках поля.

Разность потенциалов двух точек 1 и 2 в электростатическом поле определяется работой, совершаемой силами поля, при перемещении единичного положительного заряда из точки 1 в точку 2

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{12}}{Q_0}.$$

Единица разности потенциалов: вольт (В).

При решении конкретных задач физический смысл имеет именно разность потенциалов между двумя точками электростатического поля.

Эквипотенциальные поверхности — поверхности, во всех точках которых потенциал  $\varphi$  имеет одно и то же значение. Они используются для графического изображения распределения потенциала электростатического поля.

## Проводники в электростатическом поле

Проводники — тела, в которых электрический заряд может перемещаться по всему его объему.

Проводники делятся на две группы:

- *проводники первого рода* (металлы) — перенесение в них зарядов (свободных электронов) не сопровождается химическими превращениями;

• *проводники второго рода* (например, расплавленные соли, растворы кислот) — перенесение в них зарядов (положительных и отрицательных ионов) ведет к химическим изменениям.

## Диэлектрики в электростатическом поле

**Диэлектрики** — тела, в которых практически отсутствуют свободные заряды (например, стекло, пластмассы).

**Полярные диэлектрики** состоят из полярных молекул (например,  $H_2O$ ,  $NH_3$ ,  $SO_2$ ,  $CO$ ).

**Полярные молекулы** — молекулы, которые в отсутствие внешнего электрического поля обладают дипольным моментом (они имеют асимметричное строение: центры «тяжести» положительных и отрицательных зарядов не совпадают).

При отсутствии внешнего поля дипольные моменты полярных молекул вследствие теплового движения ориентированы в пространстве хаотично и их результирующий момент равен нулю.

**Неполярные диэлектрики** состоят из неполярных молекул (например,  $N_2$ ,  $H_2$ ,  $O_2$ ,  $CO_2$ ).

**Неполярные молекулы** — молекулы, имеющие симметричное строение, т. е. центры «тяжести» положительных и отрицательных зарядов в отсутствие внешнего электрического поля совпадают и, следовательно, дипольный момент молекулы равен нулю.

Под действием внешнего электрического поля заряды неполярных молекул смещаются в противоположные стороны (положительные по полю, отрицательные против поля) и молекула приобретает дипольный заряд.

**Поляризация диэлектрика** — процесс ориентации диполей или появление под воздействием электрического поля ориентированных по полю диполей.

## Емкость. Конденсаторы

**Уединенный проводник** — проводник, удаленный от других проводников, тел и зарядов.

**Емкость** определяется зарядом, сообщением которого проводнику изменяет его потенциал на единицу:

$$C = \frac{Q}{\Phi}.$$

Единица емкости: фарад ( $1 \text{ Ф} = 1 \text{ Кл/В}$ ).

**Конденсатор** — система 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.

**Емкость конденсатора** — физическая величина, равная отношению заряда  $Q$ , накопленного на обкладках конденсатора, к разности потенциалов ( $\Phi_1 - \Phi_2$ ) между ними:

$$C = \frac{Q}{\Phi_1 - \Phi_2}.$$

**Плоский конденсатор** — две параллельные металлические пластины площадью  $S$  каждая, расположенные на расстоянии  $d$  друг от друга и имеющие заряды  $+Q$  и  $-Q$  (рис. 25).

**Емкость плоского конденсатора**

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

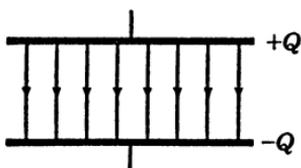
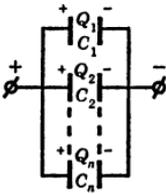
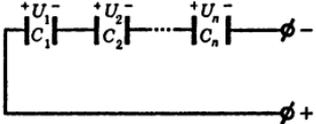


Рис. 25

где  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная,  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость диэлектрика, находящегося между обкладками конденсатора.

**Параллельное и последовательное соединения конденсаторов**

|                        | 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 | $C = C_1 + C_2 + \dots + C_n;$<br>$C = \sum_{i=1}^n C_i$                          | $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n};$<br>$\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}$ |

**Энергия электростатического поля**

⇒ Энергия уединенного заряженного проводника

$$W = \frac{C\varphi^2}{2} = \frac{Q\varphi}{2} = \frac{Q^2}{2C},$$

где  $C$ ,  $Q$ ,  $\varphi$  — соответственно емкость, заряд, потенциал проводника.

⇒ Энергия плоского конденсатора

$$W = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2} Sd = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2} V,$$

где  $E$  — напряженность электростатического поля в конденсаторе,  $V = Sd$  — объем конденсатора.

## Постоянный электрический ток

### Электрический ток, сила тока, плотность тока

**Электрический ток** — любое упорядоченное (направленное) движение электрических зарядов.

**Ток проводимости** — электрический ток, возникающий в проводнике под действием приложенного электрического поля  $\vec{E}$  в результате перемещения зарядов: положительных — по полю, отрицательных — против поля (рис. 26).

**Конвекционный ток** — упорядоченное движение электрических зарядов осуществляется перемещением в пространстве заряженного макроскопического тела (рис. 27).

За направление тока *условно* принимают направление движения *положительных зарядов*.

**Постоянный ток** — ток, сила тока и направление которого не изменяются со временем.

**Сила постоянного тока** — скалярная физическая величина, определяемая электрическим зарядом, проходящим через поперечное сечение проводника за 1 с:

$$I = \frac{Q}{t}.$$

Единица силы тока: ампер (А).

**Плотность тока** — физическая величина, определяемая силой тока, проходящего через единицу площади поперечного сечения проводника, перпендикулярно направлению тока:

$$j = \frac{I}{S}.$$

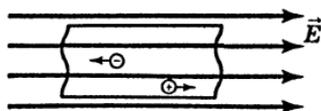


Рис. 26

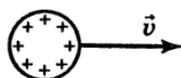


Рис. 27

Единица плотности тока: ампер на квадратный метр ( $\text{А/м}^2$ ).

Если концентрация носителей тока равна  $n$ , каждый носитель обладает зарядом  $e$  (что не обязательно для ионов) и движется со средней скоростью  $\langle v \rangle$ , то за время  $dt$  через поперечное сечение  $S$  проводника переносится заряд  $dQ = ne\langle v \rangle S dt$ . Тогда сила тока  $I = ne\langle v \rangle S$ , а плотность тока

$$\vec{j} = ne\langle \vec{v} \rangle.$$

Плотность тока — *вектор*, его направление совпадает с направлением упорядоченного движения положительных зарядов.

Электродвижущая сила (ЭДС) — физическая величина, определяемая работой, совершаемой сторонними силами при перемещении единичного положительного заряда:

$$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{ст}}}{Q_0},$$

где  $A_{\text{ст}}$  — работа сторонних сил;  $Q_0$  — единичный положительный заряд.

Единица ЭДС: 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:

$$U_{12} = \frac{A_{12} + A_{\text{ст}}}{Q_0}; \quad A_{12} = Q_0 (\varphi_1 - \varphi_2),$$

где  $A_{12}$  — работа сил электростатического поля при перемещении заряда  $Q_0$  из точки 1 в точку 2.

Напряжение — *обобщенное понятие разности потенциалов*: напряжение на концах участка цепи равно разности потенциалов, если участок не содержит источника тока.

Единица напряжения: вольт (В).

Напряжение на участке 1—2, содержащем источник тока, равно сумме ЭДС источника и разности потенциалов на этом участке:

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}_{12}.$$

## Закон Ома.

### Сопротивление проводников

*Закон Ома для однородного участка цепи (не содержащего источника тока)*

Сила тока в проводнике прямо пропорциональна приложенному напряжению и обратно пропорциональна сопротивлению проводника:

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

Сопротивление проводника зависит от размеров, формы и материала проводника.

Единица сопротивления: ом (Ом).

⇒ Сопротивление цилиндрического проводника длиной  $l$  и площадью поперечного сечения  $S$ :

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

где  $\rho$  — удельное электрическое сопротивление.

Единица удельного сопротивления: ом-метр (Ом · м).

Наименьшим удельным сопротивлением обладают серебро ( $1,6 \cdot 10^{-8}$  Ом · м) и медь ( $1,7 \cdot 10^{-8}$  Ом · м).

*Закон Ома для замкнутой цепи*

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. 28).

⇒ Напряжение на внешней цепи

$$U = IR = \mathcal{E} - Ir.$$

⇒ Закон Ома для неоднородного участка цепи (участка цепи с источником тока (рис. 29))

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}_{12}}{R},$$

где  $(\varphi_1 - \varphi_2)$  — разность потенциалов на концах участка цепи;  $\mathcal{E}_{12}$  — ЭДС источника тока, входящего в участок.

**Последовательное и параллельное соединения проводников**

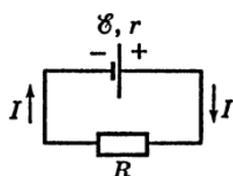


Рис. 28

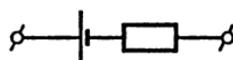


Рис. 29

|                            | 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       | $U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$                            | $I = I_1 + I_2 + \dots + I_n$   |
| Результующее сопротивление | $R = R_1 + R_2 + \dots + R_n;$<br>$R = \sum_{i=1}^n R_i$ | $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots$<br>$\dots + \frac{1}{R_n};$<br>$\frac{1}{R} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}$ |

## Работа и мощность тока. Закон Джоуля—Ленца

⇒ Работа электрического тока

$$A = IUt = I^2Rt = \frac{U^2}{R} t,$$

где  $I$  — сила тока в цепи;  $U$  — напряжение на участке цепи;  $R$  — сопротивление этого участка;  $t$  — время прохождения тока.

Единица работы: джоуль (Дж).

⇒ Закон Джоуля—Ленца

$$Q = IUt = I^2Rt = \frac{U^2}{R} t,$$

где  $Q$  — количество теплоты, выделяющееся на участке цепи за время  $t$ .

⇒ Мощность тока

$$P = IU = I^2R = \frac{U^2}{R}.$$

Единица мощности: ватт (Вт).

## Электрический ток в различных средах

### Электрический ток в металлах

⇒ Зависимости сопротивления и удельного сопротивления металлов от температуры

$$\begin{aligned} \rho &= \rho_0(1 + \alpha t), \\ R &= R_0(1 + \alpha t), \end{aligned}$$

где  $\rho$  и  $\rho_0$ ,  $R$  и  $R_0$  — соответственно удельные сопротивления и сопротивления проводника при  $t$  и  $0$  °С;  $\alpha$  — температурный коэффициент сопротивления, для чистых металлов (при не очень низких температурах)

близкий к значению  $\frac{1}{273}$  К<sup>-1</sup>.

**Сверхпроводимость** — свойство металлов и их сплавов, заключающееся в том, что их электрическое сопротивление скачком падает до нуля при охлаждении ниже *критической температуры*  $T_{кр}$ , характерной для данного проводника, т. е. металл становится *абсолютным проводником*.

Критическая температура для металлов лежит в интервале 1—20 К, а для некоторых керамических материалов — порядка 140 К; для них наблюдается *высокотемпературная сверхпроводимость*.

### Электрический ток в электролитах

**Электролиты** — вещества, растворы которых проводят электрический ток.

Электролиты — класс проводников, в которых электрический ток всегда сопровождается их химическими изменениями. К электролитам относят, например, растворы солей, кислот и щелочей.

**Электрический ток в растворах (расплавах) электролитов** — упорядоченное движение положительных и отрицательных ионов (рис. 30).

**Электролитическая диссоциация** — расщепление молекул электролита на положительные и отрицательные ионы под действием растворителя.

**Электролиз** — выделение вещества на электродах при прохождении через раствор (электролит) электрического тока.

#### Закон электролиза (закон Фарадея)

*Масса  $m$  вещества, выделившегося на электроде, пропорциональна заряду  $Q$ , прошедшему через электролит:*

$$m = kQ \quad \text{или} \quad m = kIt,$$

где  $k$  — электрохимический эквивалент вещества;  $I$  — сила тока;  $t$  — время пропускания тока через электролит.

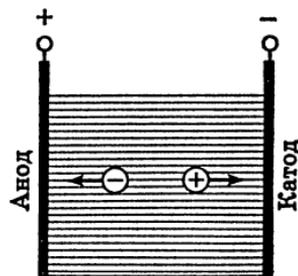


Рис. 30

**Электрохимический эквивалент вещества** — величина, определяемая массой вещества, выделяющегося на электродах при прохождении через электролит заряда 1 Кл.

Сопротивление электролита прямо пропорционально длине столба электролита ( $l$ ) и обратно пропорционально площади его поперечного сечения ( $S$ ):

$$R = \rho \frac{l}{S}.$$

⇒ **Удельное сопротивление электролитов**

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t),$$

где  $\rho$  и  $\rho_0$  — удельные сопротивления электролита соответственно при  $t$  и  $0$  °С;  $\alpha$  — температурный коэффициент сопротивления;  $\alpha < 0$ .

## Электрический ток в газах

### Ионизация газов

Газы при не слишком высокой температуре и при давлении, близком к атмосферному, являются хорошими изоляторами. Газ становится проводником электричества, когда некоторая часть его молекул ионизируется, т. е. произойдет расщепление нейтральных атомов и молекул на ионы и свободные электроны. Для этого газ надо подвергнуть действию какого-либо ионизатора.

*Ионизаторами* являются: сильный нагрев (столкновения быстрых молекул настолько сильны, что они разбиваются на ионы), коротковолновое электромагнитное излучение (ультрафиолетовое, рентгеновское); потоки электронов, протонов и т. д.

**Энергия ионизации** — энергия, которую надо затратить, чтобы из молекулы (атома) выбить один электрон (для различных веществ она  $4 \div 25$  эВ).

Единица энергии: электрон-вольт (эВ);

$$1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

### Газовый разряд

Под действием ионизатора происходит вырывание из электронной оболочки атома или молекулы электронов, образуются свободные и положительные ионы. Электроны могут присоединяться к нейтральным молекулам и атомам, превращая их в отрицательные ионы. Следовательно, в ионизованном газе имеются положительные и отрицательные ионы и свободные электроны. Прохождение электрического тока через газы называется *газовым разрядом*.

**Несамостоятельный газовый разряд** — разряд, существующий только под действием внешних ионизаторов.

**Самостоятельный газовый разряд** — разряд в газе, сохраняющийся после прекращения действия внешнего ионизатора.

### Электрический ток в полупроводниках

**Полупроводники *n*-типа** — полупроводники с примесью, валентность которой на единицу больше валентности основных атомов (рис. 31).

В данном случае один электрон не может образовать ковалентную связь, он при тепловых колебаниях решетки отщепляется (становится свободным). Поскольку ковалентная связь не нарушается, то дырка здесь не возникает. В данном случае *носители тока — электроны; возникает электронная проводимость (проводимость *n*-типа)*.

**Полупроводники *p*-типа** — полупроводники с примесью, валентность которой на единицу меньше валентности основных атомов (рис. 32).

В данном случае у атома бора для образования связей с четырьмя ближайшими соседями не хватает од-

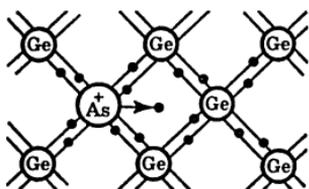


Рис. 31

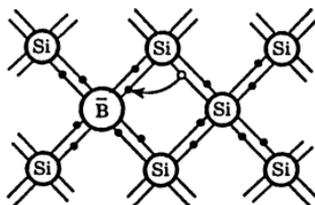


Рис. 32

ного электрона, одна из связей неукноплетована, а четвертый электрон может быть захвачен от соседнего атома основного вещества, где образуется дырка. В данном случае носители тока — дырки; возникает дырочная примесная проводимость (проводимость *p*-типа).

## Магнитное поле

### Магнитное поле и его характеристики

Магнитное поле — силовое поле в пространстве, окружающем токи и постоянные магниты.

*Магнитное поле создается только движущимися зарядами и действует только на движущиеся заряды.*

При исследовании магнитного поля используется замкнутый плоский контур с током (рамка с током), размеры которого малы по сравнению с расстоянием до токов, образующих магнитное поле. Ориентация контура в пространстве характеризуется направлением нормали к контуру. В качестве положительного направления нормали принимается направление, определяемое правилом правого винта, т. е. за положительное направление нормали принимается направление поступательного движения винта, головка которого вращается в направлении тока, текущего в рамке (рис. 33).

За направление магнитного поля в данной точке принимается направление, вдоль которого располагается положительная нормаль к свободно подвешенной рамке с током (рис. 34), или направление, сов-

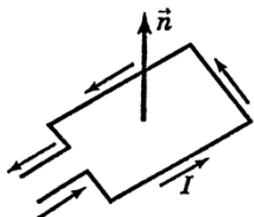


Рис. 33

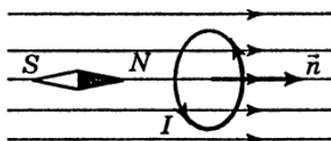


Рис. 34

падающее с направлением силы, действующей на северный полюс магнитной стрелки, помещенной в данную точку.

Магнитная индукция — 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  $\Delta l$  проводника:

$$B = \frac{F_{\max}}{I\Delta l}.$$

Единица магнитной индукции: тесла;

$$1 \text{ Тл} = 1 \text{ Н}/(\text{А} \cdot \text{м}).$$

Так как магнитное поле является *силовым*, то его, по аналогии с электрическим, изображают с помощью *линий магнитной индукции* — *линий, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора  $\vec{B}$* . 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. 35).

Линии магнитной индукции *полосового магнита* выходят из северного полюса и входят в южный (рис. 36).

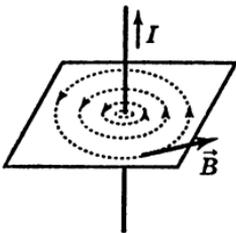


Рис. 35

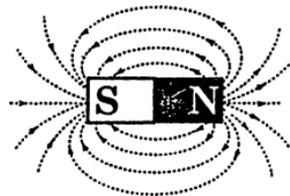


Рис. 36

## Закон Ампера.

### Взаимодействие параллельных токов.

### Магнитная постоянная

#### Закон Ампера

Сила, с которой магнитное поле с индукцией  $\vec{B}$  действует на элемент  $\Delta l$  проводника с током, находящегося в этом поле:

$$F = I B \Delta l \sin \alpha,$$

где  $\alpha$  — угол между направлением элемента проводника с током и магнитной индукцией  $\vec{B}$ .

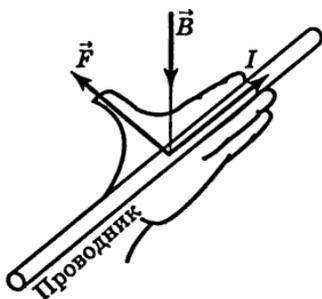


Рис. 37

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 большой палец покажет направление силы, действующей на ток (рис. 37).

## Принцип суперпозиции магнитных полей.

### Поле соленоида. Магнитный поток

#### Принцип суперпозиции (наложения) магнитных полей

Магнитная индукция результирующего поля, создаваемого несколькими токами или движущимися зарядами, равна векторной сумме магнитных индукций полей, создаваемых каждым током или движущимся зарядом в отдельности:

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \dots + \vec{B}_n,$$

$$\vec{B} = \sum_{i=1}^n \vec{B}_i.$$

### Магнитное поле соленоида

Соленоид — свернутый в спираль изолированный проводник, по которому течет электрический ток.

Однородное магнитное поле — поле, магнитная индукция которого одинакова во всех его точках.

⇒ Индукция магнитного поля внутри соленоида без сердечника

$$B = \mu_0 \frac{NI}{l},$$

где  $N$  — число витков;  $l$  — длина соленоида;  $I$  — сила тока, текущего в соленоиде;  $\mu_0$  — магнитная постоянная.

⇒ Поток вектора магнитной индукции (магнитный поток)

$$\Phi = BS \cos \alpha,$$

где  $\alpha$  — угол между вектором  $\vec{B}$  и нормалью к поверхности  $S$ .

Если вектор магнитной индукции  $\vec{B}$  перпендикулярен поверхности  $S$ , то

$$\Phi = BS.$$

Единица магнитного потока: вебер ( $1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot \text{м}^2$ ).

### Сила Лоренца.

#### Движение заряженных частиц в магнитном поле

Сила Лоренца — сила, с которой магнитное поле действует на движущиеся заряды:

$$F_{\text{Л}} = QvB \sin \alpha,$$

где  $Q$  — электрический заряд, движущийся со скоростью  $\vec{v}$  в магнитном поле с индукцией  $\vec{B}$ ;  $\alpha$  — угол между  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$ .

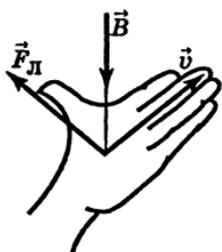


Рис. 38

Направление силы Лоренца определяется с помощью *правила левой руки*: если ладонь левой руки расположить так, чтобы в нее входил вектор  $\vec{B}$ , а четыре вытянутых пальца направить вдоль вектора  $\vec{v}$  (для  $Q > 0$  направления силы тока  $I$  и  $\vec{v}$  совпадают, для  $Q < 0$  — противоположны), то отогнутый большой палец покажет направление силы,

действующей на положительный заряд (рис. 38).

Рассматривая движение заряженных частиц в магнитном поле, будем считать, что магнитное поле *однородно* и на частицы не действуют электрические поля.

## Электромагнитная индукция

### Явление и закон электромагнитной индукции

Электромагнитная индукция — явление, заключающееся в том, что в замкнутом проводящем контуре при изменении потока магнитной индукции, охватываемого этим контуром, возникает электрический ток, получивший название *индукционного*.

Обобщая результаты опытов, 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 электромагнитной индукции (закон Фарадея)

ЭДС  $\mathcal{E}_i$  электромагнитной индукции в контуре численно равна и противоположна по знаку скорости изменения магнитного потока сквозь поверхность, ограниченную этим контуром:

$$\mathcal{E}_i = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

Единица ЭДС: вольт (В).

Этот закон является *универсальным*: ЭДС  $\mathcal{E}_i$  не зависит от способа изменения магнитного потока.

## Правило Ленца.

### ЭДС индукции в неподвижных и движущихся проводниках

#### Правило Ленца

*Индукционный ток в контуре имеет всегда такое направление, что создаваемое им магнитное поле препятствует изменению магнитного потока, вызвавшему этот индукционный ток.*

При приближении магнита к замкнутому проводнику

$$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} > 0.$$

На рис. 39  $\vec{B}_i$  — магнитная индукция поля индукционного тока  $I_i$ , причем направления  $\vec{B}_i$  и индукционного тока подчиняются правилу правого винта.

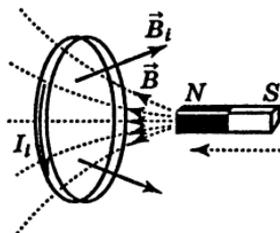


Рис. 39

#### Применение правила Ленца

На рис. 40 указаны направления индукционных токов в катушке при приближении к ней северного (рис. 40, а) и южного (рис. 40, в) полюсов полосового магнита и при удалении от нее северного (рис. 40, б) и южного (рис. 40, г).

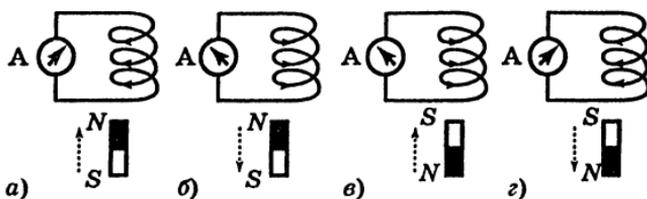


Рис. 40

### ЭДС индукции в неподвижных проводниках

Согласно закону Фарадея, возникновение ЭДС электромагнитной индукции возможно и в случае *неподвижного* контура, находящегося в *переменном* магнитном поле. Максвелл для объяснения ЭДС индукции в неподвижных проводниках предположил, что всякое переменное магнитное поле возбуждает в окружающем пространстве электрическое поле, которое и является причиной возникновения индукционного тока в проводнике.

Вихревое электрическое поле — электрическое поле, порождаемое *переменным* магнитным полем.

Линии напряженности (силовые линии) вихревого электрического поля *всегда замкнуты*. 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 неподвижного проводника равна ЭДС индукции в этом проводнике.

⇒ ЭДС индукции в движущемся проводнике

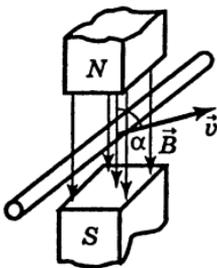


Рис. 41

$$\mathcal{E}_i = Blv \sin \alpha,$$

где  $B$  — магнитная индукция;  $l$  — длина проводника;  $v$  — скорость движения проводника в однородном магнитном поле;  $\alpha$  — угол между направлением скорости и вектором магнитной индукции (рис. 41).

### Индуктивность контура. Самоиндукция

⇒ Магнитный поток, создаваемый током  $I$  в контуре:

$$\Phi = LI,$$

где  $L$  — индуктивность контура.

**Самоиндукция** — возникновение ЭДС индукции в проводящем контуре при изменении в нем силы тока.

**Индуктивность контура** — физическая величина, определяемая магнитным потоком самоиндукции через поверхность, ограниченную проводящим контуром с током 1 А.

Единица индуктивности: генри;

$$1 \text{ Гн} = 1 \text{ Вб/А} = 1 \text{ В} \cdot \text{с/А}.$$

⇒ Закон Фарадея применительно к явлению самоиндукции

$$\mathcal{E}_i = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} \text{ или } \mathcal{E}_i = -L \frac{dI}{dt}.$$

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.

### Взаимная индукция. Трансформаторы. Энергия магнитного поля

**Взаимная индукция** — возникновение ЭДС в одном из контуров при изменении силы тока в другом (контуры находятся вблизи друг друга).

ЭДС взаимной индукции — ЭДС, индуцируемая в первом контуре, при изменении силы тока  $I_2$  во втором контуре:

$$\mathcal{E}_{i1} = -L \frac{dI_2}{dt},$$

где  $L$  — взаимная индуктивность контуров.

⇒ Энергия магнитного поля, сцепленного с контуром,

$$W = \frac{LI^2}{2},$$

где  $L$  — индуктивность контура;  $I$  — сила тока в контуре.

**Трансформатор** — устройство, применяемое для понижения или повышения напряжения переменного тока.

Работа трансформатора основана на явлении взаимной индукции. Переменный ток  $I_1$  создает в первичной обмотке (число витков  $N_1$ ) переменное магнитное поле, являющееся причиной взаимной индукции во вторичной обмотке (число витков  $N_2$ );

$$\left| \frac{U_2}{U_1} \right| = \frac{N_2}{N_1} = k,$$

где  $U_1$  и  $U_2$  — напряжения на концах первичной и вторичной обмоток;  $k$  — коэффициент трансформации ( $k > 1$  — *повышающий трансформатор*;  $k < 1$  — *понижающий*).

## Механические и электромагнитные колебания

### Гармонические колебания и их характеристики

**Колебания** — это движения или процессы, которые характеризуются определенной повторяемостью во времени.

По *характеру физических процессов* различают механические, электромагнитные и другие колебания.

**Свободные (собственные колебания)** — колебания, которые совершаются за счет первоначально сообщенной энергии при последующем отсутствии внешних воздействий на колебательную систему (систему, совершающую колебания).

**Гармонические колебания** — колебания, при которых колеблющаяся величина изменяется со временем по закону синуса или косинуса.

**Период гармонического колебания** — промежуток времени  $T$ , в течение которого фаза колебания получает приращение  $2\pi$ , т. е.

$$\omega_0(t + T) + \varphi = (\omega_0 t + \varphi) + 2\pi.$$

**Частота колебаний** — число полных колебаний, совершаемых в единицу времени:

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

Единица частоты: герц ( $1 \text{ Гц} = 1 \text{ с}^{-1}$ ).

## Механические гармонические колебания

⇒ Смещение колеблющейся точки

$$x = A \cos(\omega_0 t + \varphi),$$

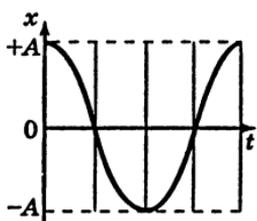
где  $A$  — амплитуда колебаний (максимальное значение колеблющейся величины);  $\omega_0$  — круговая (циклическая) частота;  $\varphi$  — начальная фаза в момент времени  $t = 0$ ;  $(\omega_0 t + \varphi)$  — фаза колебаний в момент времени  $t$ .

⇒ Скорость колеблющейся точки

$$v = \frac{dx}{dt} = -A\omega_0 \sin(\omega_0 t + \varphi) =$$

$$= A\omega_0 \cos\left(\omega_0 t + \varphi + \frac{\pi}{2}\right).$$

⇒ Ускорение колеблющейся точки



$$a = \frac{dv}{dt} = -A\omega_0^2 \cos(\omega_0 t + \varphi) =$$

$$= A\omega_0^2 \cos(\omega_0 t + \varphi + \pi).$$

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  $\pi$ . В моменты времени, когда  $x = 0$ ,  $v$  приобретает наибольшие значения; когда же  $x$  достигает максимального отрицательного значения, то  $a$  приобретает наибольшее положительное значение (рис. 42).

⇒ Сила, действующая на колеблющуюся материальную точку,

$$F = ma = -m\omega_0^2 x.$$

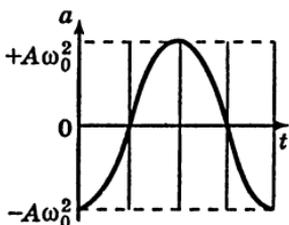
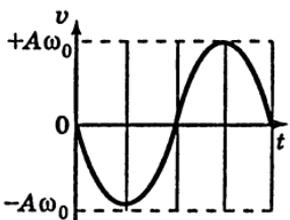


Рис. 42

Сила пропорциональна смещению материальной точки и направлена в противоположную сторону (к положению равновесия).

⇒ Кинетическая энергия материальной точки, совершающей гармонические колебания, (рис. 43):

$$E_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{mA^2\omega_0^2}{2} \sin^2(\omega_0 t + \varphi).$$

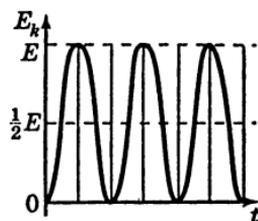


Рис. 43

### Пружинный и математический маятники

**Пружинный маятник** — груз массой  $m$ , подвешенный на абсолютно упругой пружине и совершающий гармонические колебания под действием упругой силы  $F = -kx$  ( $k$  — жесткость пружины) (рис. 44).

⇒ Круговая (циклическая) частота

$$\omega_0 = \sqrt{k/m}.$$

⇒ Закон движения пружинного маятника

$$x = A \cos(\omega_0 t + \varphi).$$

**Математический маятник** — это *идеализированная* система, состоящая из материальной точки массой  $m$ , подвешенной на нерастяжимой невесомой нити и колеблющейся под действием силы тяжести (рис. 45).

⇒ Круговая (циклическая) частота

$$\omega_0 = \sqrt{g/l}.$$

⇒ Закон движения математического маятника

$$\alpha = \alpha_0 \cos(\omega_0 t + \varphi).$$

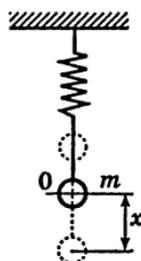


Рис. 44

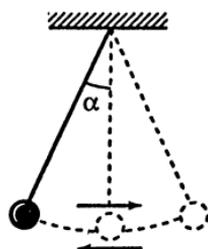


Рис. 45

- ⇒ Периоды колебаний маятников соответственно математического и физического:

$$T = 2\pi\sqrt{m/k}, \quad T = 2\pi\sqrt{l/g}.$$

- ⇒ Потенциальная энергия пружинного маятника

$$E_p = \frac{kx^2}{2}.$$

*Превращения энергии* при свободных гармонических незатухающих колебаниях происходят в соответствии с законом сохранения механической энергии:

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

При отклонении маятника из положения равновесия его потенциальная энергия увеличивается, а кинетическая — уменьшается. Если маятник проходит положение равновесия, его потенциальная энергия равна нулю, а кинетическая энергия маятника максимальна и равна полной энергии. В состоянии же максимального отклонения нулю равна кинетическая энергия, а потенциальная — максимальна и равна полной энергии.

Следовательно,  $E_{k \max} = E_{p \max}$ .

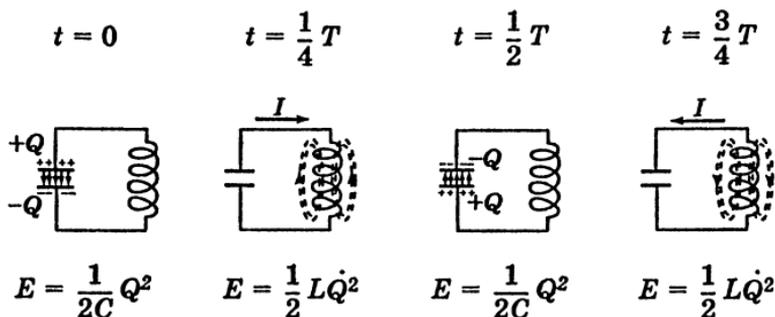
### Свободные гармонические колебания в колебательном контуре

**Колебательный контур** — цепь, состоящая из включенных последовательно катушки индуктивностью  $L$ , конденсатора электроемкостью  $C$  и резистора сопротивлением  $R$ .

Предназначен для возбуждения и поддержания электромагнитных колебаний.

Последовательные стадии колебательного процесса в идеализированном контуре ( $R \approx 0$ ) и аналогия между

электромагнитными и механическими колебаниями представлены на рис. 46, 47:



(Здесь:  $\dot{Q} = Q'$  — первая производная электрического заряда по времени.)

Рис. 46

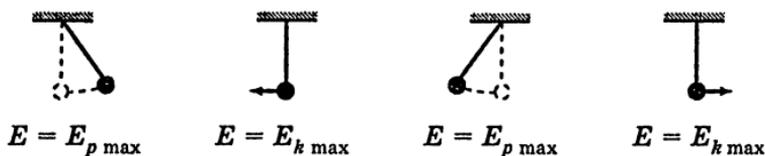


Рис. 47

⇒ Основное уравнение электромагнитных колебаний

$$Q'' = \ddot{Q} = -\frac{1}{LC} Q,$$

$$\ddot{Q} + \frac{1}{LC} Q = 0;$$

его решение

$$Q = Q_m \cos(\omega_0 t + \varphi),$$

где  $Q_m$  — амплитуда колебаний заряда;  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$  — собственная частота контура.

⇒ Период свободных незатухающих колебаний (формула Томсона)

$$T = 2\pi\sqrt{LC}.$$

⇒ Сила тока в колебательном контуре

$$I = \dot{Q} = \frac{dQ}{dt} = -\omega_0 Q_m \sin(\omega_0 t + \varphi) = \\ = I_m \cos\left(\omega_0 t + \varphi + \frac{\pi}{2}\right),$$

где  $I_m = \omega_0 Q_m$  — амплитуда силы тока.

⇒ Напряжение на конденсаторе

$$U_C = \frac{Q}{C} = \frac{Q_m}{C} \cos(\omega_0 t + \varphi) = U_m \cos(\omega_0 t + \varphi),$$

где  $U_m = Q_m/C$  — амплитуда напряжения.

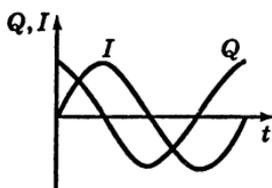


Рис. 48

Колебания силы тока  $I$  опережают по фазе колебания заряда  $Q$  на  $\pi/2$  (рис. 48), т. е. когда сила тока достигает максимального значения, заряд (а также и напряжение на конденсаторе) обращается в нуль, и наоборот.

## Упругие и электромагнитные волны

### Упругие волны

Колебания, возбужденные в какой-либо точке среды, распространяются в ней с конечной скоростью, зависящей от свойств среды, передаваясь от одной точки среды к другой.

**Волновой процесс (волна)** — процесс распространения колебаний в сплошной среде.

**Сплошная среда** — среда, непрерывно распределенная в пространстве и обладающая упругими свойствами.

**Упругие (механические) волны** — механические возмущения, распространяющиеся в упругой среде.

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 состояния колебательного

движения и его энергия. Поэтому *основным свойством* всех волн, независимо от их природы, является *перенос энергии без переноса вещества*.

*Упругая волна* называется *гармонической*, если соответствующие ей колебания частиц среды являются гармоническими.

Упругие волны бывают двух типов:

- *поперечные волны* — в них частицы среды колеблются в плоскостях, перпендикулярных направлению распространения волны.
- *продольные волны* — в них частицы среды колеблются в направлении распространения волны.

Продольные волны могут распространяться в газах, жидкостях и твердых телах, поперечные волны — в твердых телах.

**Скорость распространения волны** — физическая величина, определяемая расстоянием, проходимым за единицу времени любой точкой волновой поверхности.

**Волновая поверхность (фронт)** — геометрическое место точек среды, колеблющихся в одинаковой фазе.

**График гармонической поперечной волны, распространяющейся со скоростью  $v$  вдоль оси  $x$** , — это 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  $t$  (рис. 49).

**Длина волны** — расстояние между двумя ближайшими частицами, колеблющимися в одинаковой фазе.

Длина волны равна расстоянию, на которое распространяется определенная фаза колебания за период:

$$\lambda = vT, \quad v = \lambda\nu,$$

где  $\nu$  — частота колебаний.

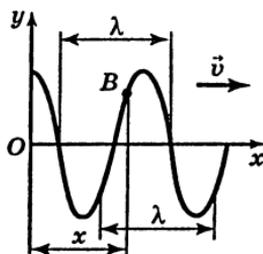


Рис. 49

**Принцип суперпозиции (наложения) волн**

При распространении в 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.

**Луч** — линия, касательная к которой в каждой точке совпадает с направлением распространения волны.

Если среда однородна и изотропна, то луч — прямая, перпендикулярная волновой поверхности и совпадающая с направлением переноса энергии волной.

**Плоские волны** — волны, для которых волновые поверхности — совокупность параллельных плоскостей, перпендикулярных направлению распространения волны.

Лучи в данном случае — параллельные прямые, совпадающие с направлением скорости распространения волны (рис. 50).

**Сферические волны** — волны, для которых волновые поверхности — совокупность концентрических сфер.

Лучи в данном случае направлены вдоль радиусов сфер от центра, где расположен источник волны (рис. 51).

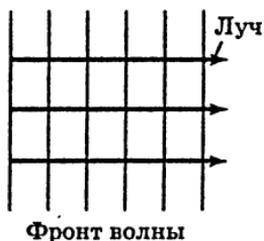


Рис. 50



Рис. 51

## Электромагнитные волны

Электромагнитные волны — переменное электромагнитное поле, распространяющееся в пространстве с конечной скоростью.

Электромагнитные волны возникают ввиду того, что переменное электрическое поле порождает переменное магнитное поле, которое в свою очередь порождает переменное электрическое поле.

Электромагнитные волны являются *поперечными*: колебания векторов напряженности  $\vec{E}$  переменного электрического поля и индукции  $\vec{B}$  переменного магнитного поля взаимно перпендикулярны и лежат в плоскости, перпендикулярной вектору  $\vec{v}$  скорости распространения волны, причем векторы  $\vec{E}$ ,  $\vec{B}$  и  $\vec{v}$  образуют правовинтовую систему (рис. 52).

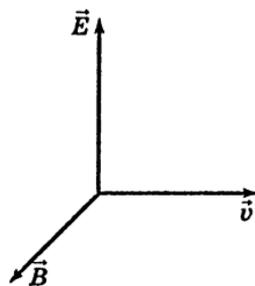


Рис. 52

В вакууме электромагнитные волны распространяются со скоростью света  $c$  (независимо от частоты колебаний).

⇒ Скорость распространения электромагнитных волн в среде

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}},$$

где  $\epsilon$  и  $\mu$  — диэлектрическая и магнитная проницаемости среды.

Взаимно перпендикулярные векторы  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  в электромагнитной волне колеблются в одинаковых фазах — они одновременно достигают максимума и одновременно обращаются в нуль.

Моментальная «фотография» плоской электромагнитной волны показана на рис. 53.

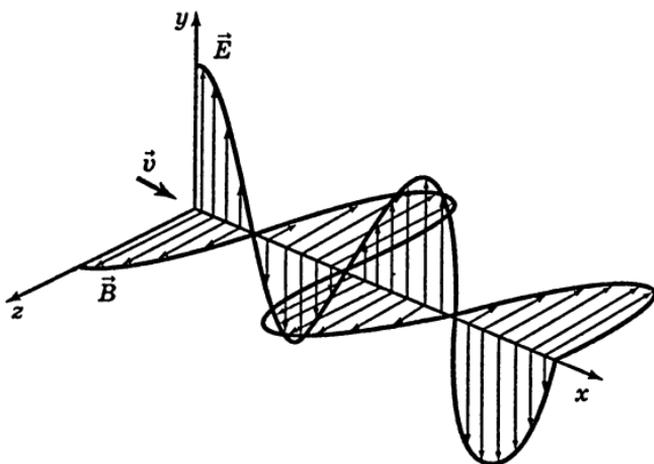


Рис. 53

**Плотность потока электромагнитного излучения** — отношение электромагнитной энергии  $\Delta W$ , проходящей за время  $\Delta t$  сквозь перпендикулярную излучению поверхность площадью  $S$ , к произведению площади  $S$  на время  $\Delta t$ :

$$I = \frac{\Delta W}{S \Delta t}.$$

Единица плотности потока излучения: ватт на метр в квадрате ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ).

⇒ **Плотность потока электромагнитного излучения**

$$I = wc,$$

где  $w$  — плотность электромагнитной энергии.

## Корпускулярная и волновая теории света

В световых явлениях наблюдается *дуализм* (двойственность) корпускулярных и волновых свойств.

Корпускулярная теория объясняет законы *взаимодействия света с веществом*, например, поглощение, рассеяние, излучение.

### *Гипотеза Планка*

Излучение и поглощение света происходит не непрерывно, а определенными порциями (квантами), энергия которых

$$\varepsilon_0 = h\nu,$$

где  $h$  — постоянная Планка;  $\nu$  — частота.

Согласно *квантовой теории света* (по Эйнштейну) излучение, поглощение и распространение света происходит в виде потока световых квантов — фотонов, энергия которых

$$\varepsilon_0 = h\nu.$$

Волновая теория объясняет законы *распространения света*, например, интерференцию, дифракцию.

### *Принцип Гюйгенса*

Каждая точка среды, до которой доходит волна, служит источником вторичных волн, а огибающая этих волн представляет собой волновую поверхность в следующий момент времени.

Волновая поверхность — геометрическое место точек, колеблющихся в одинаковой фазе.

## Основные законы оптики

### *Закон прямолинейного распространения света*

Свет в оптически однородной среде распространяется прямолинейно.

### *Закон отражения*

Отраженный луч лежит в одной плоскости с падающим лучом и перпендикуляром, проведенным к границе раздела двух сред в точке падения; угол отражения  $\beta$  равен углу падения  $\alpha$  (рис. 54):

$$\beta = \alpha.$$

### *Закон преломления*

Луч падающий, луч преломленный и перпендикуляр, проведенный к границе раздела в точке падения луча лежат в одной плоскости; отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для данных сред (рис. 54):

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n_{21},$$

где  $n_{21}$  — относительный показатель преломления (показатель преломления второй среды относительно первой).

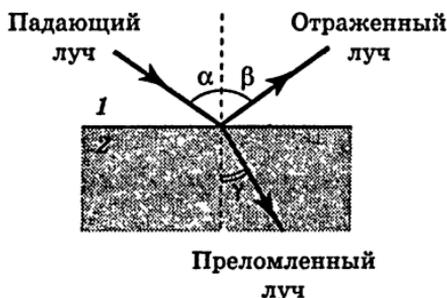


Рис. 54

**Относительный показатель преломления** равен отношению абсолютных показателей преломления двух сред:

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1}.$$

**Абсолютный показатель преломления** равен отношению скорости  $c$  электромагнитных волн в вакууме к их скорости  $v$  в среде:

$$n_1 = \frac{c}{v_1}; \quad n_2 = \frac{c}{v_2}; \quad n_{21} = \frac{v_1}{v_2}.$$

### Полное отражение

**Оптически более плотная среда** — среда с большим показателем преломления.

**Оптически менее плотная среда** — среда с меньшим показателем преломления.

Свет распространяется из оптически более плотной среды (показатель преломления  $n_1$ ) в оптически менее плотную среду (показатель преломления  $n_2$  и  $n_1 > n_2$ ). Согласно закону преломления:

$$\frac{\sin \gamma}{\sin \alpha} = \frac{n_1}{n_2} > 1,$$

т. е. угол преломления  $\gamma$  больше, чем угол падения  $\alpha$  (рис. 55).

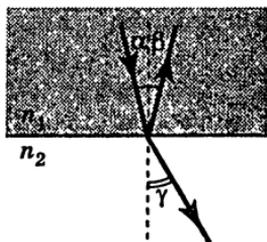


Рис. 55

*При углах падения от  $\alpha_0$  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**.*

### Линзы и их основные характеристики

**Линзы** представляют собой 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.

**Тонкая линза** — линза, толщина которой (расстояние между ограничивающими поверхностями) значительно меньше по сравнению с радиусами поверхностей, ограничивающих линзу.

Линзы делятся:

- по внешней форме (рис. 56) на двояковыпуклые (1), плосковыпуклые (2), двояковогнутые (3), плосковогнутые (4), выпукловогнутые (5), вогнутовыпуклые (6);
- по оптическим свойствам на собирающие, рассеивающие.

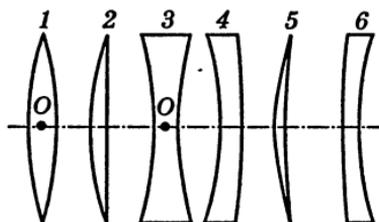


Рис. 56

### Основные элементы линзы

**Главная оптическая ось** — прямая, проходящая через центры кривизны поверхностей линзы (рис. 57).

**Оптический центр линзы** — точка, лежащая на главной оптической оси и обладающая тем свойством, что лучи проходят сквозь нее не преломляясь.

**Побочная оптическая ось** — любая прямая, проходящая через оптический центр линзы и не совпадающая с главной оптической осью.

**Фокус линзы** — точка  $F$ , лежащая на главной оптической оси, в которой пересекаются лучи параксиального (приосевого) светового пучка, распространяющиеся параллельно главной оптической оси.

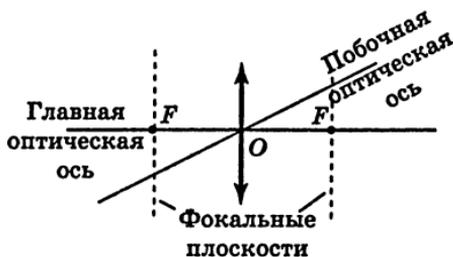


Рис. 57

**Фокальные плоскости** — плоскости, проходящие через фокусы линзы перпендикулярно ее главной оптической оси.

### Основные характеристики линзы

**Фокусное расстояние  $f$**  — расстояние между оптическим центром линзы и ее фокусом.

### Оптическая сила линзы

$$\Phi = \frac{1}{f}.$$

Единица оптической силы: диоптрия ( $1 \text{ дптр} = 1 \text{ м}^{-1}$ ).

Если  $\Phi > 0$  — линза *собирающая*; если  $\Phi < 0$  — линза *рассеивающая*.

## Построение изображений в линзах

### Формула тонкой линзы

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f},$$

где  $a$  и  $b$  — расстояния от линзы до предмета и его изображения.

Если  $a = \infty$ , т. е. лучи падают на линзу параллельным пучком (рис. 58, *а*), соответствующее этому случаю расстояние  $b = OF = f$  (равно фокусному расстоянию). Если  $b = \infty$ , т. е. изображение находится в бесконечности, и, следовательно, лучи выходят из линзы параллельным пучком (рис. 58, *б*), то  $a = OF = f$ . Таким образом, фокусные расстояния линзы, окруженные с обеих сторон одинаковой средой, равны.

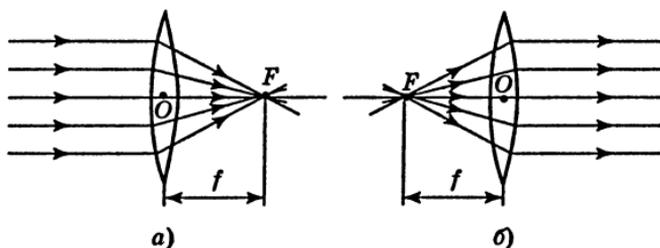


Рис. 58

Построение изображения предмета в линзах осуществляется с помощью следующих лучей:

- луч, проходящий через оптический центр линзы и не изменяющий своего направления;
- луч, идущий параллельно главной оптической оси; после преломления в линзе этот луч (или его продолжение) проходит через второй фокус линзы;
- луч (или его продолжение), проходящий через первый фокус линзы; после преломления в ней он выходит из линзы параллельно ее главной оптической оси.

Для примера приведены построения изображений в собирающей (рис. 59, а, б) и рассеивающей (рис. 59, в) линзах: действительное (рис. 59, а) и мнимое (рис. 59, б) изображения — в собирающей линзе, мнимое — в рассеивающей.

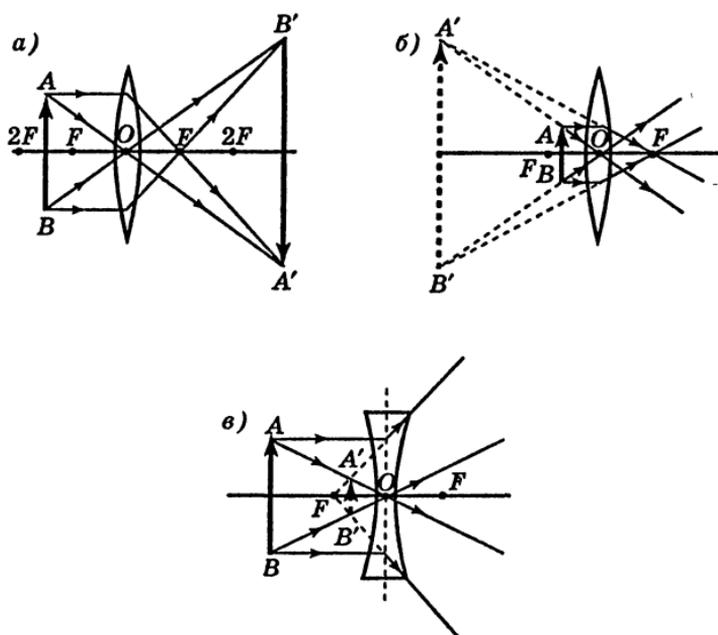


Рис. 59

## Дисперсия света

**Дисперсия света** — зависимость абсолютного показателя преломления вещества  $n$  от частоты  $\nu$  падающего на вещество света:

$$n = f(\nu) = \varphi(\lambda_0),$$

где  $\lambda_0 = c/\nu$  — длина волны в вакууме.

Дисперсию также можно определить как зависимость скорости распространения световой волны в веществе от их частоты.

Скорость света и длина волны при переходе из вакуума в среду уменьшаются, а частота колебаний остается постоянной.

На рис. 60 показано разложение в спектр пучка белого света при прохождении его сквозь призму. Отдельные цвета спектра (возникающей за призмой цветовой полосы) называются *спектральными цветами*.

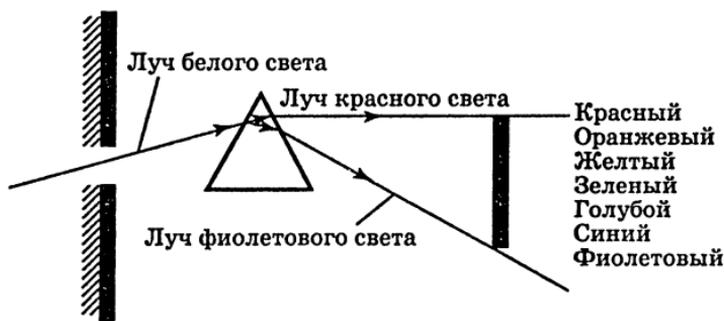


Рис. 60

Дисперсия проявляется лишь при распространении *немонохроматических* волн.

## Интерференция

Интерференция присуща волнам любой природы.

Интерферируют только когерентные волны.

**Когерентные волны** — волны, имеющие одинаковую частоту и постоянную во времени разность фаз.

**Интерференция волн** — явление, заключающееся в том, что при наложении когерентных волн в одних точках пространства колебания усиливают, а в других — ослабляют друг друга.

**Интерференция света** — частный случай интерференции волн. Явление, заключающееся в том, что при наложении когерентных световых волн происходит пространственное перераспределение светового потока: в одних местах возникают максимумы, в других — минимумы интенсивности.

⇒ Связь между разностью фаз  $\varphi$  и оптической разностью хода  $\Delta$ :

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta,$$

где  $\lambda_0$  — длина волны в вакууме.

⇒ Разность фаз двух когерентных световых волн:

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} (L_2 - L_1) = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta,$$

где  $L = sn$  — оптическая длина пути ( $s$  — геометрическая длина пути световой волны в среде);  $n$  — показатель преломления этой среды;  $\Delta = L_2 - L_1$  — оптическая разность хода двух световых волн.

⇒ Условие интерференционных максимумов

$$\Delta = \pm k\lambda_0.$$

⇒ Условие интерференционных минимумов

$$\Delta = \pm (2k + 1) \frac{\lambda_0}{2},$$

где  $k = 0, 1, 2, \dots$ .

Чтобы наблюдать интерференцию света, необходимо получить когерентные световые пучки. До появления лазеров во всех приборах для наблюдения интерференции света когерентные пучки получались путем *разделения и последующего сведения световых лучей, исходящих из одного и того же источника*, для чего использовались щели, зеркала и призмы.

## Дифракция

Дифракция присуща волнам любой природы.

Дифракция волн — явление огибания волнами препятствий, встречающихся на их пути, и проникновения их в область за препятствия.

Дифракция света — частный случай дифракции волн. 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 огибанию световыми волнами препятствий и проникновению света в область геометрической тени.

Явление дифракции объясняется с помощью принципа Гюйгенса.

### *Принцип Гюйгенса*

Каждая точка среды, до которой доходит волна, служит центром вторичных волн, а огибающая этих волн представляет собой волновую поверхность в следующий момент времени.

Принцип Гюйгенса — геометрический принцип. Он не затрагивает по существу вопроса об амплитуде, а следовательно, и об интенсивности распространяющихся за преградой световых волн.

### *Принцип Гюйгенса—Френеля*

Любая точка волновой поверхности рассматривается как источник вторичных сферических волн, а световые колебания в какой-либо 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 вторичных волн. В результате может оказаться так, что там, где проходит прямолинейный путь от источника света, будет темная область, а в пределах геометрической тени — светлая область (световые лучи как бы огибают препятствие).

**Дифракционная решетка** — совокупность параллельных щелей равной ширины, лежащих в одной плоскости и разделенных равными по ширине непрозрачными промежутками.

⇒ Период решетки

$$d = a + b,$$

где  $a$  — ширина каждой щели;  $b$  — ширина непрозрачных промежутков.

Пусть свет падает нормально к плоскости решетки. Тогда:

⇒ Условие максимумов

$$d \sin \varphi = \pm k\lambda,$$

где  $k$  — порядок спектра;  $k = 0, 1, 2, \dots$ ;  $\varphi$  — угол дифракции (определяет положение максимумов на экране).

⇒ Число максимумов, даваемое дифракционной решеткой, учитывая, что  $|\sin \varphi| \leq 1$

$$k \leq \frac{d}{\lambda}.$$

Положение максимумов зависит от  $\lambda$ , 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), дифракционная решетка может служить *спектральным прибором*.

### Различия в дифракционном и призматическом спектрах

Составные света в дифракционном и призматическом спектрах располагаются по-разному. Из условия максимумов следует, что в дифракционной решетке синус угла отклонения пропорционален длине волны. Следовательно, красные лучи, имеющие большую длину волны, чем фиолетовые, отклоняются дифракционной решеткой сильнее. Призма же разлагает лучи в спектр по значениям показателя преломления, который для всех прозрачных веществ с увеличением длины волны монотонно уменьшается (рис. 61). Следовательно, красные лучи, имеющие меньший показатель преломления, чем фиолетовые, отклоняются призмой слабее.

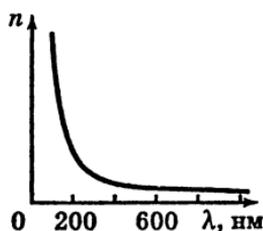


Рис. 61

### Поляризация света

*Поперечность световых волн* означает, что векторы напряженности  $\vec{E}$  электрического поля и индукции  $\vec{B}$  магнитного поля электромагнитной волны взаимно перпендикулярны и колеблются перпендикулярно вектору скорости  $\vec{v}$  распространения волны (перпендикулярно лучу) (рис. 62).

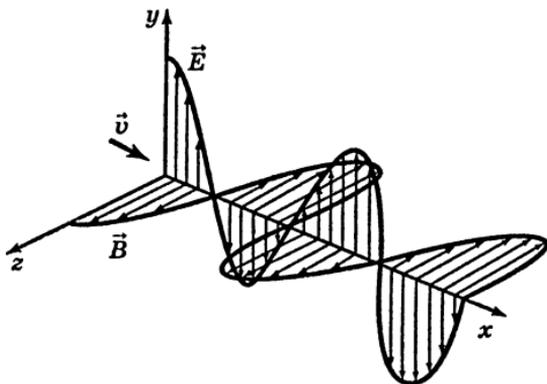


Рис. 62

Для объяснения поляризации света достаточно знать поведение одного из двух векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$ : обычно выбирают  $\vec{E}$ .

**Естественный свет** — свет со всевозможными равновероятными ориентациями вектора  $\vec{E}$ , а, следовательно, и  $\vec{B}$  (луч перпендикулярен плоскости рис. 63).

**Поляризованный свет** — свет, в котором колебания вектора  $\vec{E}$  каким-то образом упорядочены.

**Частично-поляризованный свет** — свет с преимущественным (но не исключительным!) направлением колебаний вектора  $\vec{E}$  (рис. 64).

**Плоскополяризованный свет** — свет, в котором вектор  $\vec{E}$  (а, следовательно, и  $\vec{B}$ ) колеблется только в одном направлении, перпендикулярно лучу (рис. 65).



Рис. 63



Рис. 64



Рис. 65

Естественный свет можно преобразовать в плоскополяризованный с помощью поляризаторов, пропускающих световые волны с колебаниями вектора  $\vec{E}$ , лежащими в одной определенной плоскости. Простейший *поляризатор* — кристалл турмалина (на рис. 66 он обозначен

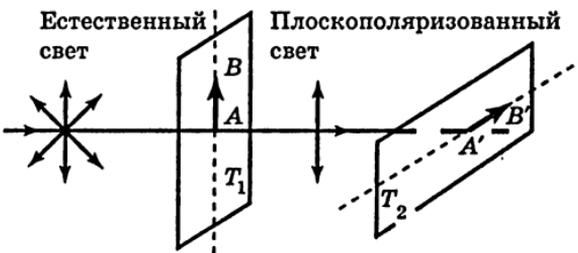


Рис. 66

через  $T_1$ ). Убедиться, что за турмалином свет плоскополяризованный, можно с помощью *анализатора*, которым служит вторая пластина турмалина  $T_2$ .

## Излучение и спектры

**Тепловое излучение** — свечение тел, обусловленное нагреванием.

Совершается за счет энергии теплового движения атомов и молекул вещества. Тепловое излучение равновесно.

**Люминесценция** — неравновесное излучение, избыточное при данной температуре над тепловым излучением тела и имеющее длительность, большую периода световых колебаний.

*По способу возбуждения различают:*

- *фотолюминесценцию* (под действием света);
- *катодолюминесценцию* (под действием электронов);
- *хемилюминесценцию* (при химических превращениях);
- *электролюминесценцию* (под действием электрического поля).

**Виды спектров:**

- *непрерывный* (сплошной) охватывает широкий диапазон длин волн (сплошная разноцветная полоса).

Эти спектры характерны для раскаленных твердых и жидких тел, а также сильно сжатых газов.

- *линейчатый* — совокупность отдельных спектральных линий, соответствующих дискретным значениям длин волн.

Эти спектры характерны для веществ в газообразном атомарном состоянии.

- *полосатый* — совокупность отдельных полос, каждая из которых охватывает некоторый интервал длин волн.

Эти спектры характерны для молекул, не связанных или слабо связанных друг с другом.

Световые квантыФотоэффект

**Фотоэффект** — испускание электронов веществом под действием света.

*Законы фотоэффекта*

I. При фиксированной частоте падающего света число фотоэлектронов, вырываемых из катода за единицу времени, пропорционально интенсивности света (закон Столетова).

II. Максимальная начальная скорость (максимальная кинетическая энергия) фотоэлектронов не зависит от интенсивности падающего света, а определяется только его частотой  $\nu$ .

III. Для каждого вещества существует красная граница фотоэффекта, т. е. минимальная частота  $\nu_{\min}$  света (зависит от химической природы вещества и состояния его поверхности), ниже которой фотоэффект невозможен.

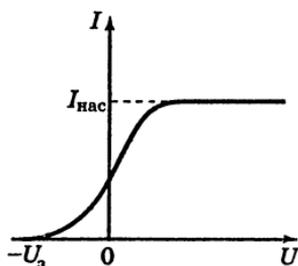


Рис. 67

Вольт-амперная характеристика фотоэффекта — зависимость фототока  $I$ , образуемого потоком электронов, испускаемых под действием света, от напряжения  $U$  между электродами (рис. 67).

Задерживающее напряжение  $-U_3$ . При  $U = U_3$  ни один из

электронов, даже обладающий при вылете из катода максимальной скоростью, не может преодолеть задерживающего поля и достигнуть анода:

$$\frac{mv_{\max}^2}{2} = eU_3.$$

**Фототок насыщения**  $I_{\text{нас}}$  — определяется таким значением  $U$ , при котором все электроны, испускаемые катодом, достигают анода.

### Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта

Это уравнение выведено на основе *квантовой теории фотоэффекта*, согласно которой свет частотой  $\nu$  не только *испускается*, но и *распространяется* в пространстве и *поглощается* веществом отдельными порциями (квантами), энергия которых

$$\varepsilon_0 = h\nu,$$

где  $\nu$  — частота падающего фотона;  $h$  — постоянная Планка.

⇒ Уравнение Эйнштейна:

$$h\nu = A + \frac{mv_{\max}^2}{2}.$$

Энергия падающего фотона расходуется на работу выхода  $A$  электрона из металла и на сообщение вылетающему электрону максимальной кинетической энергии, равной  $\frac{mv_{\max}^2}{2}$ .

Это уравнение можно записать также в виде:

$$h\nu = h\nu_{\min} + eU_3,$$

где  $U_3$  — задерживающее напряжение;  $\nu_{\min}$  — минимальная частота, при которой фотоэффект еще возможен.

⇒ Красная граница фотоэффекта

$$\nu_{\min} = \frac{A}{h}, \quad \lambda_{\max} = \frac{hc}{A},$$

где  $\lambda_{\max}$  — максимальная длина волны падающего света ( $\nu_{\min}$  — соответственно минимальная частота), при которой фотоэффект еще возможен.

Работа выхода выражается в электронвольтах:

$$1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

### Давление света

⇒ Давление, производимое светом при нормальном падении на поверхность,

$$p = \frac{E_e}{c} (1 + \rho),$$

где  $\rho$  — коэффициент отражения;  $E_e = Nh\nu$  — энергия всех фотонов, падающих на единицу поверхности в единицу времени.

## Атомная физика

### Линейчатый спектр атома водорода

⇒ Эмпирическая формула Бальмера описывает серии в спектре простейшего атома — атома водорода:

$$\nu = R \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$

где  $\nu$  — частота спектральных линий в спектре атома водорода;  $R$  — постоянная Ридберга ( $R = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$ );  $m$  определяет серию ( $m = 1, 2, 3, \dots$ ); а  $n$  определяет отдельные линии соответствующей серии ( $n = m + 1, m + 2, \dots$ ).

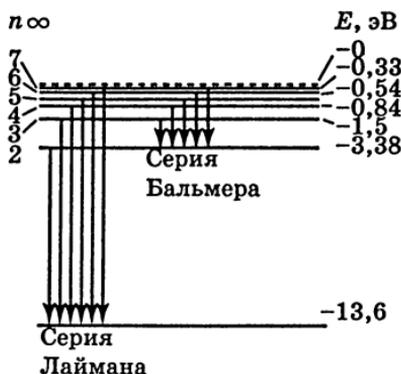


Рис. 68

⇒ Серия Лаймана (рис. 68)

$$\nu = R \left( \frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$

$$m = 1; \quad n = 2, 3, 4, \dots$$

⇒ Серия Бальмера

$$\nu = R \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$

$$m = 2; \quad n = 3, 4, 5, \dots$$

### Первый постулат Бора

В атоме существуют стационарные (не изменяющиеся со временем) состояния, в которых он не излучает энергию. Эти состояния характеризуются определенными дискретными значениями энергии.

Стационарным состояниям атома соответствуют стационарные орбиты, по которым движутся электроны. Движение электронов по стационарным орбитам не сопровождается излучением электромагнитных волн.

В стационарном состоянии атома электрон, двигаясь по круговой орбите, должен иметь дискретные квантованные значения момента импульса, удовлетворяющие условию

$$m_e v_n r_n = n \hbar \quad (n = 1, 2, 3, \dots),$$

где  $m_e$  — масса электрона,  $v_n$  — его скорость по  $n$ -й орбите радиуса  $r_n$ ,  $\hbar = \frac{h}{2\pi}$  — постоянная Планка.

### Второй постулат Бора

При переходе электрона с одной орбиты на другую излучается (поглощается) один фотон с энергией  $h\nu = E_n - E_m$ , равной разности энергий соответствующих стационарных состояний ( $E_n$  и  $E_m$  — соответственно энергии стационарных состояний атома до и после излучения (поглощения)).

При  $E_m < E_n$  происходит излучение фотона, при  $E_m > E_n$  — поглощение фотона. Набор возможных дискретных частот  $\nu = (E_n - E_m)/\hbar$  квантовых переходов и определяет линейчатый спектр атома.

### Атом водорода по Бору

⇒ Уравнение, описывающее движение электрона в атоме водорода по окружности под действием кулоновской силы:

$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n^2} = \frac{m_e v_n^2}{r_n}, \quad (*)$$

где  $e$  — элементарный заряд;  $m_e$  и  $v_n$  — масса и скорость электрона на орбите радиуса  $r_n$ ;  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная.

Из решения системы

$$\begin{cases} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n^2} = \frac{m_e v_n^2}{r_n} & \text{(из уравнения (*)),} \\ m_e v_n r_n = n\hbar & \text{(из первого постулата Бора)} \end{cases}$$

получаем формулу для радиуса  $n$ -й стационарной орбиты

$$r_n = n^2 \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{m_e e^2}, \quad n = 1, 2, \dots$$

⇒ 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 электрона в атоме водорода

$$E_p = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}.$$

⇒ Полная энергия атома складывается из кинетической энергии электрона и потенциальной энергии взаимодействия электрона с ядром:

$$E = -\frac{1}{2} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r},$$

где  $e$  — элементарный заряд;  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная;  $r$  — расстояние между электроном и ядром.

⇒ Энергетические уровни электрона в атоме

$$E_n = -\frac{1}{n^2} \frac{m_e e^4}{8h^2\epsilon_0^2}, \quad n = 1, 2, \dots$$

Энергия электрона в атоме водорода может принимать только дискретные значения.

Состояние с минимальной энергией ( $n = 1$ ) называется *основным*. Состояния с  $n > 1$  называются *возбужденными*.

## Физика атомного ядра

### Атомное ядро

Атомное ядро состоит из элементарных частиц — *протонов* ( $p$ ) и *нейтронов* ( $n$ ). Протоны и нейтроны называются *нуклонами*.

| Частица | Заряд                    | Масса покоя |
|---------|--------------------------|-------------|
| $p$     | $+1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл | 0           |
| $n$     | $1836 m_e$               | $1839 m_e$  |

⇒ Символ элемента

$${}^A_Z X;$$

$Z$  — зарядовое число ядра, равно числу протонов в ядре; совпадает с порядковым номером химического элемента в Периодической системе;

$A$  — массовое число, равно числу нуклонов в ядре (сумме протонов  $Z$  и нейтронов  $N$ ).

Например,  ${}^{238}_{92}\text{U}$ .

⇒ Заряд ядра

$$+Ze.$$

Поскольку атом нейтрален, заряд ядра определяет и число электронов в атоме.

В ядерной физике различают:

- *изотопы* — ядра с одинаковым  $Z$ , но разными  $A$ ;
- *изобары* — ядра с одинаковым  $A$ , но разными  $Z$ ;
- *изотоны* — ядра с одинаковым числом нейтронов.

## Энергия связи ядра. Дефект массы ядра

Энергия связи ядра — энергия, которую надо затратить, чтобы расщепить ядро на отдельные нуклоны:

$$\begin{aligned} E_{\text{св}} &= [Zm_p + (A - Z)m_n - m_{\text{я}}]c^2 = \\ &= [Zm_{\text{H}} + (A - Z)m_n - m]c^2, \end{aligned}$$

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.

Удельная энергия связи — энергия связи, отнесенная к одному нуклону

$$\delta E_{\text{св}} = \frac{E_{\text{св}}}{A},$$

где  $A$  — массовое число; характеризует устойчивость (прочность) ядер: чем больше удельная энергия связи, тем устойчивее ядро.

Из рис. 69 следует, что легкие и тяжелые ядра менее устойчивы.

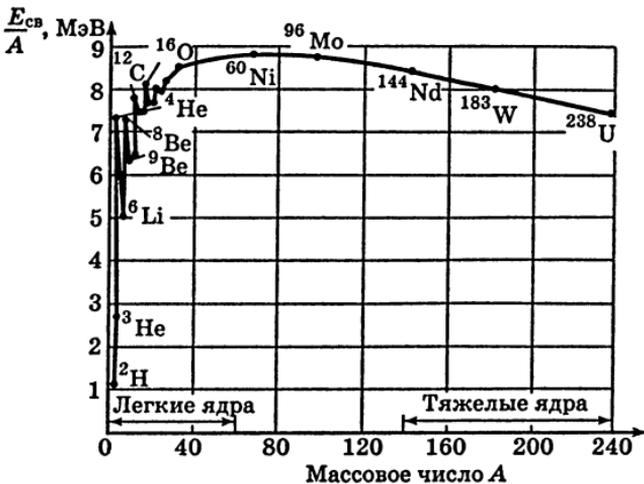


Рис. 69

Энергетически выгодно:

1) деление тяжелых ядер на более легкие;

2) слияние легких ядер друг с другом в более тяжелые ядра.

⇒ Дефект массы ядра

$$\Delta m = [Zm_p + (A - Z)m_n] - m_{\text{я}},$$

где  $m_p$ ,  $m_n$ ,  $m_{\text{я}}$  — соответственно массы протона, нейтрона и ядра;  $Z$  — зарядовое число;  $A$  — массовое число.

На эту величину уменьшается масса всех нуклонов при образовании из них атомного ядра.

⇒ Энергия связи ядра

$$E_{\text{св}} = \Delta mc^2.$$

## Ядерные силы

**Ядерные силы** — особые специфические силы, действующие в ядре между нуклонами, относятся к классу сильных взаимодействий.

### Основные свойства ядерных сил

- Являются *короткодействующими* — их действие проявляется на расстояниях  $\sim 10^{-15}$  м.
- При увеличении расстояния между нуклонами быстро уменьшаются до нуля.
- При расстояниях, меньших их радиуса действия, примерно в сто раз больше кулоновских сил, действующих между протонами на том же расстоянии.
- Являются *силами притяжения*.
- Им свойственна *зарядовая независимость*: ядерные силы одинаковы при действии двух протонов, двух нейтронов или протона и нейтрона.
- Отсюда следует, что *ядерные силы имеют незлектростатическую природу*.
- Им свойственно *насыщение*, т. е. каждый нуклон в ядре взаимодействует только с ограниченным числом ближайших к нему нуклонов.

- *Они не являются центральными, т. е. действующими по линии, соединяющей центры взаимодействующих нуклонов.*

## Радиоактивность

**Радиоактивность** — явление самопроизвольного (спонтанного) превращения атомных ядер в другие ядра с испусканием различных видов радиоактивных излучений.

**Искусственная радиоактивность** наблюдается у изотопов, полученных в ядерных реакциях.

**Естественная радиоактивность** наблюдается у неустойчивых изотопов, существующих в природе.

**Радиоактивный распад** — естественное радиоактивное превращение ядер, происходящее самопроизвольно.

### Типы радиоактивных излучений

- *Альфа-излучение*

$\alpha$ -Излучение отклоняется электрическим и магнитным полями, обладает высокой ионизирующей способностью и малой проникающей способностью; представляет собой поток ядер гелия; заряд  $\alpha$ -частицы равен  $+2e$ , а масса совпадает с массой изотопа гелия  ${}^4_2\text{He}$ .

- *Бета-излучение*

$\beta$ -Излучение отклоняется электрическим и магнитным полями; его ионизирующая способность значительно меньше (примерно на два порядка), а проникающая способность гораздо больше, чем у  $\alpha$ -частиц; представляет собой поток быстрых электронов.

- *Гамма-излучение*

$\gamma$ -Излучение не отклоняется электрическим и магнитным полями, обладает относительно слабой ионизирующей способностью и очень большой проникающей способностью; при прохождении через кристаллы обнаруживает дифракцию; представляет собой коротковолновое электромагнитное излучение с чрез-

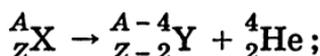
вычайно малой длиной волны  $\lambda < 10^{-10}$  м и вследствие этого — ярко выраженными *корпускулярными свойствами*, т. е. является потоком частиц —  $\gamma$ -квантов (фотонов).

## Правила смещения. Закон радиоактивного распада

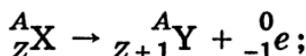
### *Правила смещения*

Правила, позволяющие установить, какое ядро возникает в результате распада данного материнского ядра:

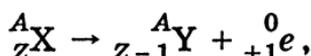
- $\alpha$ -распад



- $\beta^-$ -распад

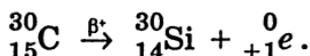
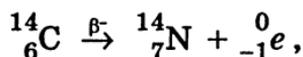
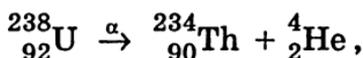


- $\beta^+$ -распад



где  ${}^A_Z\text{X}$  — материнское ядро; Y — символ дочернего ядра;  ${}^4_2\text{He}$  —  $\alpha$ -частица;  ${}^0_{-1}e$ ,  ${}^0_{+1}e$  — символическая запись электрона и позитрона соответственно; Z — зарядовое число; A — массовое число.

Примеры  $\alpha$ - и  $\beta$ -распадов:



Правила смещения — следствие законов сохранения заряда и массового числа.

Сумма зарядовых чисел возникающих ядер и частиц равна зарядовому числу исходного ядра.

Сумма массовых чисел возникающих ядер и частиц равна массовому числу исходного ядра.

⇒ Закон радиоактивного распада

$$N = N_0 e^{-\lambda t},$$

где  $N$  — число нераспавшихся ядер в момент времени  $t$ ;  $N_0$  — начальное число нераспавшихся ядер (в момент времени  $t = 0$ );  $\lambda$  — постоянная радиоактивного распада,  $e$  — основание натурального логарифма.

⇒ Число ядер, распавшихся за время  $t$ ,

$$\Delta N = N_0 - N = N_0(1 - e^{-\lambda t});$$

зависимость  $N(t)$  представлена на рис. 70.

Закон радиоактивного распада — статистический закон (справедлив при наличии очень большого числа радиоактивных ядер).

Период полураспада  $T_{1/2}$  — время, за которое исходное число ядер в среднем уменьшается вдвое.

Согласно закону радиоактивного распада,

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda t},$$

откуда

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}.$$

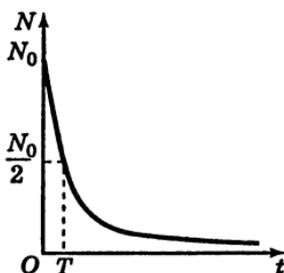
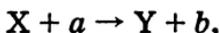


Рис. 70

## Ядерные реакции

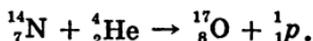
**Ядерные реакции** — это превращение атомных ядер при взаимодействии с элементарными частицами (в том числе и с  $\gamma$ -квантами) или друг с другом.

⇒ Символическая запись



где  $X$ ,  $Y$  — соответственно исходное и конечное ядра,  $a$  и  $b$  — бомбардирующая и испускаемая (или испускаемые) в ядерной реакции частицы.

⇒ Первая в истории ядерная реакция (Резерфорд) 1919 г.



### *Законы сохранения зарядовых и массовых чисел в ядерных реакциях*

*Сумма зарядовых чисел ядер и частиц, вступающих в реакцию, равна сумме зарядовых чисел конечных продуктов (ядер и частиц) реакции.*

*Сумма массовых чисел ядер и частиц, вступающих в реакцию, равна сумме массовых чисел конечных продуктов реакции.*

**Экзотермическая ядерная реакция** — реакция с выделением энергии.

**Эндотермическая ядерная реакция** — реакция с поглощением энергии.

### **Условная классификация ядерных реакций**

- *По роду участвующих в реакциях частиц:*  
реакции под действием нейтронов;  
реакции под действием заряженных частиц (например, протонов,  $\alpha$ -частиц).
- *По роду участвующих в реакциях ядер:*  
реакции на легких ядрах ( $A < 50$ );  
реакции на средних ядрах;  
реакции на тяжелых ядрах ( $A > 150$ ).
- *По энергии частиц, вызывающих реакции:*  
реакции на малых, средних и высоких энергиях.

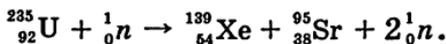
- По характеру происходящих ядерных превращений: реакции с испусканием нейтронов; реакции с испусканием заряженных частиц.

### Реакция деления ядра

Тяжелое ядро под действием нейтронов, а как впоследствии оказалось, и других частиц делится на несколько более легких ядер (осколков), чаще всего на два ядра, близких по массе.

В случае тяжелых ядер  $\frac{N}{Z} \approx 1,6$ . Образовавшиеся осколки деления перегружены нейтронами, в результате чего они и выделяют *нейтроны деления*.

⇒ Пример реакции деления



**Цепная реакция деления** — ядерная реакция, в которой частицы, вызывающие реакцию, образуются как продукты реакции.

**Необходимое условие для развития цепной реакции:** коэффициент размножения нейтронов  $k \geq 1$ .

**Коэффициент размножения нейтронов** — отношение числа нейтронов в данном поколении к их числу в предыдущем поколении.

**Самоподдерживающаяся реакция** — реакция, при которой число нейтронов с течением времени не изменяется (при  $k = 1$ ).

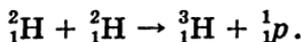
**Развивающаяся реакция** — реакция, при которой число делений непрерывно растет, и реакция может стать взрывной (при  $k > 1$ ).

**Затухающая реакция** — реакция, при которой число делений уменьшается, и реакция становится затухающей (при  $k < 1$ ).

**Термоядерная реакция** — реакция синтеза легких атомных ядер в более тяжелые, происходящая при сверхвысокой температуре ( $10^7$  К и выше).

**Реакция синтеза атомных ядер** — реакция образования из легких ядер более тяжелых.

Например,



## Элементарные частицы

### Классификация элементарных частиц

Элементарные частицы объединяются в три группы: *фотоны, лептоны и адроны* (адроны в свою очередь делятся на *мезоны и барионы*). Элементарные частицы (см. таблицу), отнесенные к каждой из этих групп, обладают общими свойствами и характеристиками, которые отличают их от частиц другой группы.

**Фотоны** — группа элементарных частиц, состоит из одной частицы — фотона.

**Лептоны** — группа элементарных частиц, к которой относят *электрон, мюон, тау-лептон, электронное нейтрино, мюонное нейтрино, таонное нейтрино* и их *античастицы*.

Лептоны участвуют только в электромагнитном и слабом взаимодействиях.

**Адроны** — самая большая группа элементарных частиц, к которой относят *нуклоны (протон и нейтрон), пионы, каоны, гипероны* и их *античастицы*. Адроны обладают *сильным взаимодействием* наряду с *электромагнитным и слабым*.

«Зоопарк» элементарных частиц (их общее число (вместе с античастицами) более 400) расширяется за счет группы адронов.

### *Принцип зарядового сопряжения*

|| *Для каждой элементарной частицы должна существовать античастица.*

Из общих принципов квантовой теории следует, что частицы и античастицы должны иметь одинаковую массу, одинаковое время жизни в вакууме, одинаковые по модулю, но противоположные по знаку электрические заряды (и магнитные моменты), а также одинаковые остальные характеристики, приписываемые элементарным частицам.

Эксперименты показывают, что за немногим исключением ( $\gamma$ -квант,  $\pi^0$ -мезон,  $\eta^0$ -мезон) действительно каждой частице соответствует античастица (см. таблицу).

Элементарные частицы

ТАБЛИЦА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

| Группа         | Название частицы     | Символ     |                  | Заряд, ед. $e$ | Масса покоя, ед. $m_e$ | Приблизительное время жизни, с |                |                           |
|----------------|----------------------|------------|------------------|----------------|------------------------|--------------------------------|----------------|---------------------------|
|                |                      | частицы    | анти-частицы     |                |                        |                                |                |                           |
| <b>ФОТОНЫ</b>  | Фотон                | $\gamma$   |                  | 0              | 0                      | Стабилен                       |                |                           |
| <b>Лептоны</b> | Электрон             | $e^-$      | $e^+$            | 1              | 1                      | Стабилен                       |                |                           |
|                | Электронное нейтрино | $\nu_e$    | $\bar{\nu}_e$    | 0              | 0                      | Стабильно                      |                |                           |
|                | Мюон                 | $\mu^-$    | $\mu^+$          | 1              | 206,8                  | $\approx 10^{-6}$              |                |                           |
|                | Мюонное нейтрино     | $\nu_\mu$  | $\bar{\nu}_\mu$  | 0              | 0                      | Стабильно                      |                |                           |
|                | Тау-лептон           | $\tau^-$   | $\tau^+$         | 1              | 3487                   | $\approx 10^{-12}$             |                |                           |
|                | Таонное нейтрино     | $\nu_\tau$ | $\bar{\nu}_\tau$ | 0              | 0                      | ?                              |                |                           |
| <b>Адроны</b>  | <i>Мезоны</i>        | Пионы      |                  | $\pi^0$        |                        | 0                              | 264,1          | $\approx 10^{-16}$        |
|                |                      |            |                  | $\pi^+$        | $\pi^-$                | 1                              | 273,1          | $\approx 10^{-8}$         |
|                |                      | Каоны      |                  | $K^0$          | $\bar{K}^0$            | 0                              | 974,0          | $10^{-10}$ —<br>$10^{-8}$ |
|                |                      |            |                  | $K^+$          | $K^-$                  | 1                              | 966,2          | $\approx 10^{-8}$         |
|                |                      | Эта-мезон  |                  | $\eta^0$       |                        | 0                              | 1074           | $\approx 10^{-19}$        |
|                | <i>Барионы</i>       | Протон     | p                | $\bar{p}$      | 1                      | 1836,2                         | Стабилен       |                           |
|                |                      | Нейтрон    | n                | $\bar{n}$      | 0                      | 1838,7                         | $\approx 10^3$ |                           |

Продолжение табл.

| Группа |         | Название частицы | Символ      |              | Заряд, ед. $e$ | Масса покоя, ед. $m_e$ | Приблизительное время жизни, с |
|--------|---------|------------------|-------------|--------------|----------------|------------------------|--------------------------------|
|        |         |                  | частицы     | анти-частицы |                |                        |                                |
| Адроны | Барионы | Гипероны:        |             |              |                |                        |                                |
|        |         | лямбда           | $\Lambda^0$ | $\Lambda^0$  | 0              | 2183                   | $\approx 10^{-10}$             |
|        |         | сигма            | $\Sigma^0$  | $\Sigma^0$   | 0              | 2334                   | $\approx 10^{-20}$             |
|        |         |                  | $\Sigma^+$  | $\Sigma^+$   | 1              | 2328                   | $\approx 10^{-10}$             |
|        |         |                  | $\Sigma^-$  | $\Sigma^-$   | 1              | 2343                   | $\approx 10^{-10}$             |
|        |         | кси              | $\Xi^0$     | $\Xi^0$      | 0              | 2573                   | $\approx 10^{-10}$             |
|        |         |                  | $\Xi^-$     | $\Xi^-$      | 1              | 2586                   | $\approx 10^{-10}$             |
|        |         | омега            | $\Omega^-$  | $\Omega^-$   | 1              | 3273                   | $\approx 10^{-10}$             |

### Типы взаимодействий элементарных частиц

- *Сильное взаимодействие.*

Обуславливает связь протонов и нейтронов в ядрах атомов и обеспечивает исключительную прочность этих образований, лежащих в основе стабильности вещества.

- *Электромагнитное взаимодействие.*

Характерно для всех элементарных частиц, за исключением нейтрино, антинейтрино и фотона. Ответственно, в частности, за существование атомов и молекул, обуславливая взаимодействие в них положительно заряженных ядер и отрицательно заряженных электронов.

• *Слабое взаимодействие.*

Ответственно за взаимодействие частиц, происходящих с участием нейтрино и антинейтрино (например,  $\beta$ -распад), а также за безнейтринные процессы распада, характеризующиеся довольно большим временем жизни распадающейся частицы.

• *Гравитационное взаимодействие.*

Присуще всем без исключения частицам, однако ввиду малости масс элементарных частиц, оно пренебрежимо мало и в процессах микромира, по-видимому, несущественно.

**Характер фундаментальных взаимодействий**

Фундаментальные взаимодействия характеризуются *относительной интенсивностью и радиусом действия*. Чем сильнее интенсивность, тем быстрее протекают процессы. Сильное и слабое взаимодействия — *короткодействующие*.

| Взаимодействие   | Интенсивность   | Радиус действия, м |
|------------------|-----------------|--------------------|
| Сильное          | $\sim 1$        | $\sim 10^{-16}$    |
| Электромагнитное | $1/137$         | $\infty$           |
| Слабое           | $\sim 10^{-10}$ | $\sim 10^{-18}$    |
| Гравитационное   | $\sim 10^{-38}$ | $\infty$           |

**Кварки**

Развитие работ по классификации элементарных частиц сопровождалось поисками новых, более фундаментальных частиц, которые могли бы служить базисом для построения всех адронов. Эти частицы были названы *кварками*.

Согласно модели Гелл-Манна—Цвейга, все известные адроны можно было построить, постулировав су-

ществование кварков и соответствующих *антикварков*, если им приписать дробные(!) электрические заряды (а также некоторые другие дробные характеристики, не рассматриваемые в средней школе).

| Кварк (антикварк) | Электрический заряд, ед. $e$ |
|-------------------|------------------------------|
| $u (\bar{u})$     | $+2/3 \quad (-2/3)$          |
| $d (\bar{d})$     | $-1/3 \quad (+1/3)$          |
| $s (\bar{s})$     | $-1/3 \quad (+1/3)$          |
| $c (\bar{c})$     | $+2/3 \quad (-2/3)$          |
| $b (\bar{b})$     | $-1/3 \quad (+1/3)$          |
| $t (\bar{t})$     | $+2/3 \quad (-2/3)$          |

Самое удивительное (почти невероятное) свойство кварков связано с их электрическим зарядом, поскольку еще никто не находил частиц с дробным значением элементарного электрического заряда.

*Фундаментальное свойство элементарных частиц — их взаимопревращаемость.*

Для всех типов взаимодействия элементарных частиц выполняются законы сохранения энергии, импульса, момента импульса и электрических зарядов.

В настоящее время считается, что истинно элементарными частицами являются 6 лептонов и 6 антилептонов. Андроны, согласно современным представлениям, состоят из кварков и антикварков.

Точка зрения сегодняшнего (а завтрашнего?) дня такова: между лептонами и кварками существует симметрия — число лептонов должно быть равно числу типов кварков (их сейчас предсказано тоже шесть).

**Единицы физических величин,  
используемые в справочнике**

| Наименование<br>величины                                 | Единица                         |                  |  |
|--|---------------------------------|------------------|--|
|  | определяющее<br>уравнение       | обозначение      | наименование<br>и определение  |
| <i>Единицы геометрических<br/>и механических величин</i> |                                 |                  |  |
| Площадь  | $S = l^2$                       | м <sup>2</sup>   | Квадратный метр равен площади квадрата со сторонами, длины которых равны 1 м   |
| Объем  | $V = l^3$                       | м <sup>3</sup>   | Кубический метр равен объему куба с ребрами, длины которых равны 1 м   |
| Скорость   | $v = \frac{s}{t}$               | м/с              | Метр в секунду равен скорости равномерного и прямолинейного движения, при котором точка за 1 с перемещается на расстояние 1 м              |
| Ускорение  | $a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$ | м/с <sup>2</sup> | Метр в секунду в квадрате равен ускорению прямолинейного ускоренного движения точки, при котором за 1 с скорость точки изменяется на 1 м/с |

| Наименование величины           | Единица  |                    |  |
|---------------------------------|--|--------------------|--|
|                                 | определяющее уравнение                         | обозначение        | наименование и определение   |
| Угловая скорость                | $\omega = \frac{\varphi}{t}$                   | рад/с              | РадIAN в секунду равен угловой скорости равномерно вращающегося тела, все точки которого, за 1 с поворачиваются относительно оси на угол 1 рад |
| Угловое ускорение               | $\varepsilon = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$ | рад/с <sup>2</sup> | РадIAN на секунду в квадрате равен ускорению равноускоренного вращающегося тела, при котором оно за 1 с изменит угловую скорость на 1 рад/с    |
| Частота периодического процесса | $T = \frac{1}{\nu}$                            | Гц                 | Герц равен частоте периодического процесса, при которой за 1 с совершается один цикл процесса  |
| Плотность                       | $\rho = \frac{m}{V}$                           | кг/м <sup>3</sup>  | Килограмм на кубический метр равен плотности однородного вещества, масса которого при объеме 1 м <sup>3</sup> равна 1 кг                       |
| Сила                            | $F = ma$                                       | Н                  | НьюТон равен силе, которая массе 1 кг сообщает ускорение 1 м/с <sup>2</sup> в направлении действия силы<br>1 Н = 1 кг · м/с <sup>2</sup>       |

Приложение

Продолжение табл.

| Наименование величины | Единица                |             |   |
|-----------------------|------------------------|-------------|---|
|                       | определяющее уравнение | обозначение | наименование и определение  |
| Импульс               | $p = mv$               | кг · м/с    | Килограмм-метр в секунду равен импульсу материальной точки массой 1 кг, движущейся со скоростью 1 м/с   |
| Давление              | $p = \frac{F}{S}$      | Па          | Паскаль равен давлению, создаваемому силой 1 Н, равномерно распределенной по нормальной к ней поверхности площадью 1 м <sup>2</sup><br>1 Па = 1 Н/м |
| Работа, энергия       | $A = Fs$               | Дж          | Джоуль равен работе, совершаемой силой 1 Н на пути 1 м<br>1 Дж = 1 Н · м  |
| Мощность              | $N = \frac{A}{t}$      | Вт          | Ватт равен мощности, при которой за время 1 с совершается работа 1 Дж<br>1 Вт = 1 Дж/с  |
| Момент силы           | $M = Fl$               | Н · м       | Ньютон-метр равен моменту силы, равной 1 Н, относительно точки, расположенной на расстоянии 1 м от линии действия силы                              |

Продолжение табл.

| Наименование величины                  | Единица                       |  |  |
|--|-------------------------------|--|--|
|  | определяющее уравнение        | обозначение                                    | наименование и определение   |
| <i>Единицы тепловых величин</i>        |                               |  |  |
| Количество теплоты, внутренняя энергия |                               | Дж   | Джоуль равен количеству теплоты, эквивалентному работе 1 Дж  |
| Тепловой поток (тепловая мощность)     |                               | Вт   | Ватт равен тепловому потоку, эквивалентному механической мощности 1 Вт   |
| Теплоемкость системы                   | $C = \frac{dQ}{dT}$           | Дж/К   | Джоуль на кельвин равен теплоемкости системы, температура которой повышается на 1 К при количестве теплоты 1 Дж          |
| Удельная теплоемкость                  | $c = \frac{Q}{m\Delta T}$     | $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$   | Джоуль на килограмм-кельвин равен удельной теплоемкости вещества, имеющего при массе 1 кг теплоемкость 1 Дж/К            |
| Молярная теплоемкость                  | $C_m = \frac{Q}{\nu\Delta T}$ | $\frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$ | Джоуль на моль-кельвин равен молярной теплоемкости вещества, имеющего при количестве вещества 1 моль теплоемкость 1 Дж/К |

Продолжение табл.

| Наименование величины                            | Единица                |                              |   |
|--|------------------------|------------------------------|---|
|  | определяющее уравнение | обозначение                  | наименование и определение  |
| Поверхностное натяжение                          | $\sigma = \frac{F}{l}$ | Н/м =<br>= Дж/м <sup>2</sup> | Ньютон на метр равен поверхностному натяжению жидкости, создаваемому силой 1 Н, приложенной к участку контура свободной поверхности длиной 1 м и действующей нормально к контуру и по касательной к поверхности |
| <i>Единицы электрических и магнитных величин</i> |                        |                              |   |
| Электрический заряд (количество электричества)   | $Q = It$               | Кл                           | Кулон равен электрическому заряду, проходящему через поперечное сечение проводника при силе постоянного тока 1 А за время 1 с   |
| Объемная плотность электрического заряда         | $\rho = \frac{Q}{V}$   | Кл/м <sup>3</sup>            | Кулон на кубический метр равен объемной плотности электрического заряда, при которой в объеме 1 м <sup>3</sup> равномерно распределен заряд 1 Кл  |

Приложение

Продолжение табл.

| Наименование величины                         | Единица                |                              |   |
|---|------------------------|------------------------------|---|
|   | определяющее уравнение | обозначение                  | наименование и определение  |
| Поверхностная плотность электрического заряда | $\sigma = \frac{Q}{S}$ | Кл/м <sup>2</sup>            | Кулон на квадратный метр равен поверхностной плотности электрического заряда, при которой заряд, равномерно распределенный по поверхности 1 м <sup>2</sup> , равен 1 Кл   |
| Линейная плотность электрического заряда      | $\tau = \frac{Q}{l}$   | Кл/м                         | Кулон на метр равен линейной плотности электрического заряда, при котором заряд, равномерно распределенный по нити длиной 1 м, равен 1 Кл   |
| Напряженность электрического поля             | $E = \frac{F}{Q_0}$    | $\frac{Н}{Кл} = \frac{В}{м}$ | Ньютон на кулон равен напряженности электрического поля в точке поля, в которой на точечный электрический заряд 1 Кл поле действует с силой 1 Н<br><br>Вольт на метр равен напряженности однородного электрического поля, создаваемого разностью потенциалов 1 В, между точками, находящимися на расстоянии 1 м на линии напряженности поля |

Продолжение табл.

| Наименование величины         | Единица                   |                  |   |
|-------------------------------|---------------------------|------------------|---|
|                               | определяющее уравнение    | обозначение      | наименование и определение  |
| Электрический потенциал       | $\varphi = \frac{A}{Q_0}$ | В                | Вольт равен потенциалу такой точки поля, в которой заряд 1 Кл обладает потенциальной энергией 1 Дж<br>1 В = 1 Дж/Кл   |
| Электрическая емкость         | $C = \frac{Q}{\varphi}$   | Ф                | Фарад равен емкости такого уединенного проводника, потенциал которого изменяется на 1 В при сообщении ему заряда 1 Кл   |
| Электрический момент диполя   | $p =  Ql $                | Кл · м           | Кулон-метр равен электрическому моменту диполя, заряды которого, равные каждый 1 Кл, расположены на расстоянии 1 м один от другого  |
| Плотность электрического тока | $j = \frac{I}{S}$         | А/м <sup>2</sup> | Ампер на квадратный метр равен плотности электрического тока, при которой сила тока, равномерно распределенного по поперечному сечению проводника площадью 1 м <sup>2</sup> , равна 1 А |

Приложение

Продолжение табл.

| Наименование величины                | Единица                   |             |  |
|--------------------------------------|---------------------------|-------------|--|
|                                      | определяющее уравнение    | обозначение | наименование и определение   |
| Электрическое сопротивление          | $R = \frac{U}{I}$         | Ом          | Ом равен сопротивлению такого проводника, в котором при напряжении 1 В течет постоянный ток 1 А  |
| Электрическая проводимость           | $G = \frac{1}{R}$         | См          | Сименс равен проводимости участка электрической цепи сопротивлением 1 Ом   |
| Удельное электрическое сопротивление | $\rho = \frac{RS}{l}$     | Ом · м      | Ом-метр равен удельному электрическому сопротивлению проводника площадью поперечного сечения 1 м <sup>2</sup> и длиной 1 м, имеющего сопротивление 1 Ом                        |
| Удельная электрическая проводимость  | $\sigma = \frac{1}{\rho}$ | См/м        | Сименс на метр равен удельной электрической проводимости проводника, который при площади поперечного сечения 1 м <sup>2</sup> и длине 1 м имеет электрическую проводимость 1 м |

Продолжение табл.

| Наименование величины | Единица                |             |  |
|-----------------------|------------------------|-------------|--|
|                       | определяющее уравнение | обозначение | наименование и определение   |
| Магнитная индукция    | $B = \frac{F}{Il}$     | Тл          | Тесла 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 проходит ток 1 А<br>$1 \text{ Тл} = 1 \text{ Н}/(\text{А} \cdot \text{м})$ |
| Магнитный поток       | $\Phi = BS$            | Вб          | Вебер равен магнитному потоку, проходящему сквозь плоскую поверхность площадью 1 м <sup>2</sup> , расположенную перпендикулярно однородному магнитному полю, индукция которого равна 1 Тл<br>$1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot \text{м}^2$  |
| Индуктивность         | $L = \frac{\Phi}{I}$   | Гн          | Генри равен индуктивности такого контура, магнитный поток самоиндукции которого при токе 1 А равен 1 Вб<br>$1 \text{ Гн} = 1 \text{ Вб}/\text{А}$  |

| Наименование<br>величины  | Единица                         |  |  |
|---|---------------------------------|--|--|
|   | определяющее<br>уравнение       | обозначение                                    | наименование<br>и определение  |
| <i>Единицы величин энергетической фотометрии<br/>и световых величин</i> |                                 |  |  |
| Энергия<br>излучения  | $W$                             | Дж   | Джоуль равен энергии излучения, эквивалентной работе 1 Дж  |
| Поток<br>излучения  | $\Phi = \frac{W}{t}$            | Вт   | Ватт равен потоку излучения, эквивалентному механической мощности 1 Вт   |
| Энергетическая<br>сила<br>света (сила<br>излучения)                     | $I = \frac{\Phi}{\omega}$       | Вт/ср  | Ватт на стерадиан равен энергетической силе света точечного источника, излучающего в телесном угле 1 ср поток излучения 1 Вт   |
| Энергетическая<br>яркость   | $B = \frac{\Delta I}{\Delta S}$ | $\frac{\text{Вт}}{\text{ср} \cdot \text{м}^2}$ | Ватт на стерадиан-квадратный метр равен энергетической яркости равномерно излучающей плоской поверхности 1 м <sup>2</sup> в перпендикулярном ей направлении при силе излучения 1 Вт/ср |

Приложение

Окончание табл.

| Наименование величины | Единица                |                   |   |
|-----------------------|------------------------|-------------------|---|
|                       | определяющее уравнение | обозначение       | наименование и определение  |
| Световой поток        |                        | лм                | Люмен равен световому потоку, испускаемому точечным источником силой света 1 кд внутри телесного угла 1 ср (при равномерности поля излучения внутри телесного угла) |
| Светимость            | $R = \frac{\Phi}{S}$   | лм/м <sup>2</sup> | Люмен на квадратный метр равен светимости поверхности площадью 1 м <sup>2</sup> , испускающей световой поток 1 лм   |
| Яркость               | $B = \frac{I}{S}$      | кд/м <sup>2</sup> | Кандела на квадратный метр равна яркости светящейся поверхности площадью 1 м <sup>2</sup> и силе света 1 кд   |
| Освещенность          | $E = \frac{\Phi}{S}$   | лк                | Люкс равен освещенности поверхности, на 1 м <sup>2</sup> которой падает световой поток 1 лм   |

---

# Содержание

---

## Часть 1

### МЕХАНИКА

|   |    |
|---|----|
| Механика . . . . .                                    | 3  |
| Кинематика . . . . .                                  | 3  |
| Динамика . . . . .                                    | 12 |
| Механика жидкостей . . . . .                          | 22 |
| Элементы специальной теории относительности . . . . . | 24 |

## Часть 2

### МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

|   |    |
|---|----|
| Молекулярно-кинетическая теория . . . . .         | 26 |
| Свойства паров, жидкостей и твердых тел . . . . . | 33 |

## Часть 3

### ТЕРМОДИНАМИКА

## Часть 4

### ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

|  |    |
|--|----|
| Электрические поле . . . . .                   | 49 |
| Постоянный электрический ток . . . . .         | 58 |
| Электрический ток в различных средах . . . . . | 62 |
| Магнитное поле . . . . .                       | 66 |
| Электромагнитная индукция . . . . .            | 70 |

## Часть 5

### КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

|   |    |
|---|----|
| Механические и электромагнитные колебания . . . . . | 75 |
| Упругие и электромагнитные волны . . . . .          | 80 |

## Часть 6

### ОПТИКА

## Часть 7

### КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| Световые кванты . . . . .      | 98  |
| Атомная физика . . . . .       | 100 |
| Физика атомного ядра . . . . . | 104 |
| Элементарные частицы . . . . . | 112 |

|   |     |
|---|-----|
| ПРИЛОЖЕНИЕ. Единицы физических величин,<br>используемые в справочнике . . . . . | 117 |
|---|-----|



Книга серии «Справочные материалы»  
содержит краткие сведения  
из всех разделов школьного курса физики.  
Несмотря на небольшой объем данного  
пособия, в нем приводятся формулировки  
всех основных физических законов  
и понятий, а также формулы,  
необходимые для решения задач.  
Эта книга окажется полезной школьникам  
старших классов и абитуриентам  
при повторении курса физики и подготовке  
к Единому государственному экзамену.

ISBN 5-329-00954-5



9 785329 009545