

# ФИЗИКА

ВСЕШКОЛЬНЫЙ КУРС

В ТАБЛИЦАХ





# ФИЗИКА

## ВЕСЬ ШКОЛЬНЫЙ КУРС В ТАБЛИЦАХ

*4-е издание*

Минск  
«Современная школа»  
«Кузьма»  
2010

## ОСНОВЫ КИНЕМАТИКИ

**Кинематика** — это раздел механики, изучающий механическое движение без учета причин (сил), которые его вызывают.

**Механическое движение** — это изменение положения тела или его частей в пространстве относительно других тел с течением времени.

Положение тела в пространстве и его движение можно задать только относительно какого-нибудь системы отсчета.

Система отсчета состоит из:

- **тела отсчета**, относительно которого рассматривают движение;
- **системы координат**, связанной с телом отсчета;
- **способа измерения** времени.

Всякое движение тела можно разложить на два основных вида движения — **поступательное** и **вращательное**.

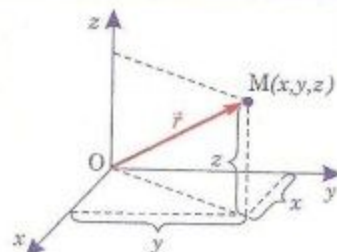
**Поступательное движение** — это движение тела, при котором все его точки движутся одинаково.

**Вращательное движение** — это движение тела, при котором все его точки движутся по окружностям, центры которых лежат на одной и той же прямой, называемой осью вращения.

**Материальная точка** — это тело, размерами которого в данных условиях можно пренебречь.

## Способы задания движения материальной точки

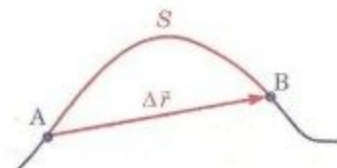
**Векторный способ:** положение материальной точки в данный момент времени характеризуется радиусом-вектором  $\vec{r}$ , проведенным из начала координат в данную точку.



**Координатный способ:** положение материальной точки в данный момент времени характеризуется тремя координатами  $x$ ,  $y$  и  $z$ :

$$r = |\vec{r}| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}.$$

**Траектория** — линия, которую описывает материальная точка в пространстве при своем движении.



По виду траекторий различают прямолинейное и криволинейное движения.

**Путь  $S$**  — расстояние, пройденное точкой при ее движении по траектории. Путь — скалярная величина.

**Перемещение  $\Delta \vec{r}$**  — вектор, соединяющий начальное и конечное положения точки.

Модуль вектора перемещения

$$\Delta r = |\Delta \vec{r}| = \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2 + (z_B - z_A)^2}.$$

! При прямолинейном движении тела в одном направлении  $|\Delta \vec{r}| = S$ .



## ОСНОВЫ КИНЕМАТИКИ

## Скорость

**Средняя (путевая) скорость**  $\langle v \rangle$  численно равна отношению пройденного пути  $\Delta S$  к промежутку времени  $\Delta t$ , за который этот путь был пройден:

$$\langle v \rangle = \frac{\Delta S}{\Delta t} \text{ или } \langle v \rangle = \frac{S}{t}.$$

**Средняя скорость перемещения**  $\langle \vec{v} \rangle$  численно равна отношению перемещения  $\Delta \vec{r}$  к промежутку времени  $\Delta t$ , за который это перемещение было совершено:

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

**Мгновенная скорость**  $\vec{v}$  — это скорость в данный момент времени. Это векторная физическая величина, численно равная отношению малого перемещения  $\Delta \vec{r}$  к малому промежутку времени  $\Delta t$ , за который это перемещение произошло:

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

! Скорость характеризует быстроту и направление движения. Скорость всегда направлена по касательной к траектории.

! Единица скорости в системе СИ  $[v] = 1 \text{ м/с}$ .

## Ускорение

**Ускорение**  $\vec{a}$  — векторная физическая величина, численно равная отношению изменения скорости  $\Delta \vec{v}$  к промежутку времени  $\Delta t$ , за которое это изменение произошло:

$$\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{\Delta t}.$$

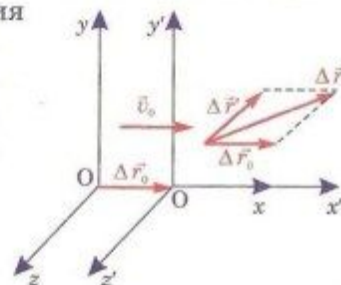
! Ускорение характеризует быстроту изменения скорости по модулю и направлению.

! Единица ускорения в системе СИ  $[a] = 1 \text{ м/с}^2$ .

## Относительность движения

Перемещение тела  $\Delta \vec{r}$  за данный промежуток времени относительно неподвижной системы отсчета равно геометрической сумме его перемещения  $\Delta \vec{r}'$  относительно подвижной системы отсчета и перемещения  $\Delta \vec{r}_0$  подвижной системы отсчета относительно неподвижной за этот промежуток времени:

$$\Delta \vec{r} = \Delta \vec{r}' + \Delta \vec{r}_0.$$



Скорость тела  $\vec{v}$  относительно неподвижной системы отсчета равна геометрической сумме его скорости  $\vec{v}'$  относительно подвижной системы отсчета и скорости  $\vec{v}_0$  подвижной системы отсчета относительно неподвижной:

$$\vec{v} = \vec{v}' + \vec{v}_0.$$

(классический закон сложения скоростей)



## ОСНОВЫ КИНЕМАТИКИ

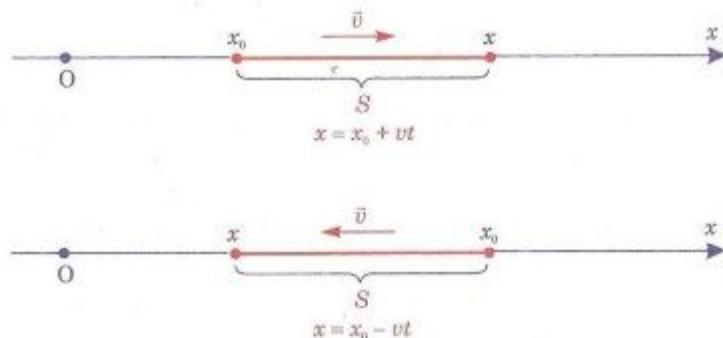
## Равномерное прямолинейное движение

Движение, при котором тело за любые равные промежутки времени проходит одинаковые расстояния, называется **равномерным движением**.

При равномерном прямолинейном движении:

ускорение	$\vec{a} = 0$ ;
скорость	$\vec{v} = \text{const}$ ;
перемещение	$\Delta \vec{r} = \vec{v} \Delta t$ ;
пройденный путь	$S = vt$ ;
координата	$x = x_0 \pm v_x t$ (кинематическое уравнение равномерного прямолинейного движения)

! Проекция скорости  $v_x$  берется со знаком «+», если направление скорости совпадает с направлением выбранной оси, в противоположном случае берется со знаком «-».



## Равнопеременное прямолинейное движение

Движение тела, при котором модуль скорости за любые равные промежутки времени изменяется на одну и ту же величину, называется **равнопеременным движением**.

При равнопеременном прямолинейном движении:

ускорение  $\vec{a} = \text{const}$  ;

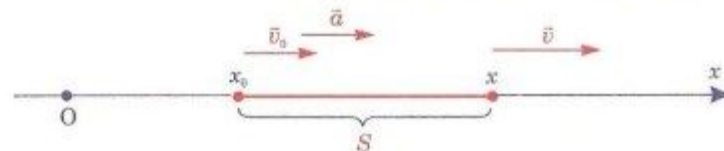
скорость  $\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t$  .

! Если вектор ускорения сонаправлен с вектором скорости, то движение будет равноускоренным, если вектор ускорения противоположен вектору скорости, то движение равнозамедленное:

перемещение  $\Delta \vec{r} = \vec{v}_0 t + \frac{\vec{a}t^2}{2}$  ;

пройденный путь  $S = v_{0x}t \pm \frac{a_x \cdot t^2}{2}$  или  $S = \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{\pm 2a}$  ;  
(при движении в одну сторону)

координата  $x = x_0 \pm v_{0x}t \pm \frac{a_x t^2}{2}$  .  
(кинематическое уравнение равнопеременного прямолинейного движения)



! Проекция скорости  $v_x$  (проекция ускорения  $a_x$ ) берется со знаком «+», если направление скорости (ускорения) совпадает с направлением выбранной оси, в противоположном случае проекция скорости  $v_x$  (проекция ускорения  $a_x$ ) берется со знаком «-».

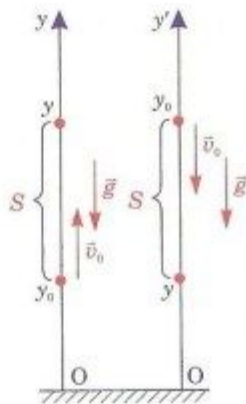


## ОСНОВЫ КИНЕМАТИКИ

## Свободное падение тел

Важным частным случаем равнопеременного прямолинейного движения является **свободное падение тел**, которое осуществляется под действием только силы тяжести. Ускорение, с которым свободно падают тела, называют **ускорением свободного падения**.

Ускорение свободного падения  $\vec{g}$  совпадает по направлению с вектором силы тяжести. Оно не зависит от массы тела, но зависит от широты местности и высоты  $h$ , на которой находится движущееся у поверхности Земли тело. На широте  $\varphi = 45^\circ$  и на уровне моря ускорение  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ . Если  $h \ll R_3$  ( $R_3$  — радиус Земли), ускорение свободного падения  $\vec{g} = \text{const}$ , и поэтому можно использовать формулы равнопеременного движения:



ускорение  $\vec{g} = \text{const}$ ;

скорость  $\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{g}t$ ;

перемещение  $\Delta \vec{r} = \vec{v}_0 t + \frac{\vec{g}t^2}{2}$ ;

пройденный путь  $S = v_{0y}t \pm \frac{g \cdot t^2}{2}$  и  $S = \frac{v_y^2 - v_{0y}^2}{\pm 2g}$ ;

(при движении в одну сторону)

координата  $y = y_0 \pm v_{0y}t \pm \frac{gt^2}{2}$ .

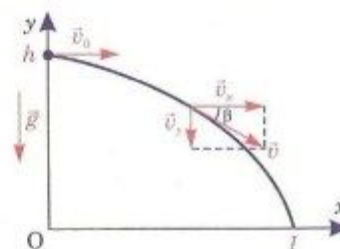
## Движение тела, брошенного горизонтально

На брошенное тело в отсутствии силы сопротивления движению действует только сила тяжести.

Движение тела, брошенного горизонтально со скоростью  $\vec{v}_0$ , является плоским (двухмерным) видом движения.

Вдоль оси  $Ox$  тело движется равномерно со скоростью  $\vec{v}_0$  и равноускоренно вдоль оси  $Oy$  с ускорением свободного падения  $\vec{g}$ .

Траектория движения тела представляет параболу.



Координаты  $x$  и  $y$  тела в момент времени  $t$

$$x = v_0 t; \quad y = h - \frac{gt^2}{2}.$$

Уравнение траектории движения

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

Проекции вектора скорости  $v_x$  и  $v_y$  в момент времени  $t$

$$v_x = v_0 \quad v_y = -gt.$$

Модуль скорости  $v$  в момент времени  $t$

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{v_0^2 + (gt)^2}.$$

Тангенс угла  $\beta$  между вектором скорости  $\vec{v}$  и горизонтом

$$\tg \beta = \frac{|v_y|}{|v_x|} = \frac{v_0}{gt}.$$

Время полета тела

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

Дальность полета тела

$$l = v_x t = v_0 \sqrt{\frac{2h}{g}}.$$



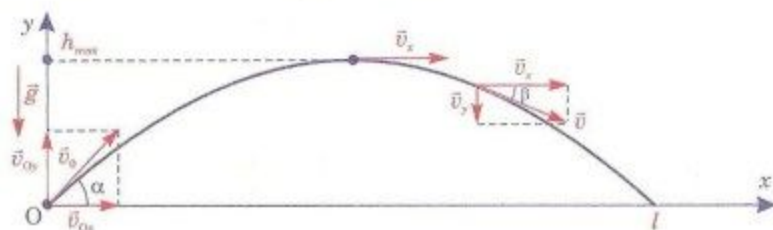
## ОСНОВЫ КИНЕМАТИКИ

Движение тела,  
брошенного под углом к горизонту

Как и в случае движения тела, брошенного горизонтально, на тело, брошенное со скоростью  $\vec{v}_0$  под углом  $\alpha$  к горизонту, действует только сила тяжести (силой сопротивления движению пренебрегаем).

Движение является **плоским** (двухмерным). Вдоль оси Ох тело движется **равномерно** со скоростью  $v_x = v_0 \cos \alpha$ , а вдоль оси Оу — **равнопеременно** с ускорением свободного падения  $\vec{g}$  (до максимальной высоты подъема равнозамедленно, после — равноускоренно).

Траектория движения тела представляет **параболу**.



Координаты  $x$  и  $y$  тела  
в момент времени  $t$

$$\begin{aligned}x &= v_x t = v_0 \cos \alpha t; \\y &= v_0 \sin \alpha t - \frac{gt^2}{2}.\end{aligned}$$

Уравнение траектории  
движения

$$y = \operatorname{tg} \alpha x - \left( \frac{g}{2v_0^2 \cos^2 \alpha} \right) x^2.$$

Проекции вектора скорости  
 $v_x$  и  $v_y$  в момент времени  $t$

$$\begin{aligned}v_x &= v_0 \cos \alpha; \\v_y &= v_0 \sin \alpha - gt.\end{aligned}$$

Тангенс угла  $\beta$  между  
вектором скорости  $\vec{v}$   
и горизонтом в момент  
времени  $t$

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{v_y}{v_x} = \frac{v_0 \sin \alpha - gt}{v_0 \cos \alpha}.$$

Модуль скорости  $v$  в момент времени  $t$

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{(v_0 \cos \alpha)^2 + (v_0 \sin \alpha - gt)^2}.$$

Время полета тела

(Время полета тела в два раза  
больше времени подъема тела  
на максимальную высоту.)

$$t_{\text{пол}} = \frac{2v_0 \sin \alpha}{g}.$$

Время подъема тела  
на максимальную высоту

(В наивысшей точке траектории  
проекция скорости  $v_y = 0$ .)

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

Дальность полета тела

$$l = v_x t_{\text{пол}} = v_0 \cos \alpha \frac{2v_0 \sin \alpha}{g} = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g}.$$

(Максимальная дальность полета  
при заданной начальной скорости  $v_0$   
достигается при угле бросания  $\alpha = 45^\circ$ .)

Максимальная высота  
подъема

$$h_{\text{max}} = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g}.$$



## ОСНОВЫ КИНЕМАТИКИ

## Линейная и угловая скорости

Для характеристики движения тела по дуге окружности используют **угловую скорость**.

**Угловая скорость**  $\omega$  — это физическая величина, численно равная отношению угла поворота радиуса к промежутку времени, за который этот поворот был совершен:

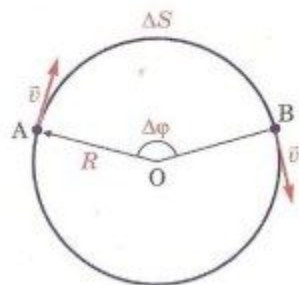
$$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}.$$

При равномерном вращении по окружности ( $\omega = \text{const}$ ) угол поворота будет определяться соотношением

$$\Delta\varphi = \omega\Delta t.$$

Если в момент времени  $t_0 = 0$  начальный угол равен  $\varphi_0$ , то

$$\varphi = \varphi_0 + \omega t.$$



! Угловая скорость характеризует быстроту поворота тела.

! Единица угловой скорости в системе СИ  
 $[\omega] = 1 \text{ рад/с} = 1 \text{ с}^{-1}$ .

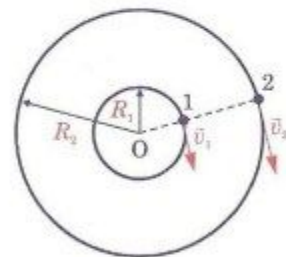
Скорость  $\vec{v}$  вращающегося тела в этом случае называют **линейной скоростью** этого тела.

Угловая и линейная скорости связаны соотношениями

$$v = \frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{\Delta\varphi \cdot R}{\Delta t} = \omega \cdot R,$$

$$\omega = \frac{v}{R}.$$

! При вращении тела относительно некоторой оси угол поворота  $\Delta\varphi$  и угловая скорость  $\omega$  для всех точек тела будут одинаковыми. В то же время путь  $\Delta S$  и линейная скорость  $v$  будут зависеть от расстояния  $R$  до оси вращения.



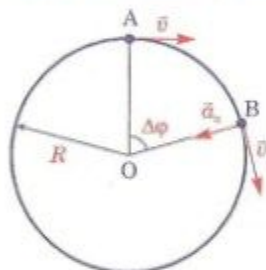
$$\omega = \frac{v_1}{R_1} = \frac{v_2}{R_2} \Rightarrow \frac{v_2}{v_1} = \frac{R_2}{R_1}$$



## ОСНОВЫ КИНЕМАТИКИ

## Равномерное движение по окружности

Равномерное движение по окружности — простейший и наиболее важный случай криволинейного движения. При равномерном движении по окружности скорость тела с течением времени **не изменяется по модулю, а изменяется только по направлению**. Поскольку скорость точки изменяется по направлению, то при равномерном движении по окружности тело имеет **ускорение**. Это ускорение направлено в любой момент времени к центру окружности и называется **центростремительным ускорением**.



Центростремительное ускорение  $a_n$  определяется соотношением

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

Для описания равномерного движения точки по окружности вводят понятия **периода и частоты вращения**.

**Период вращения  $T$**  — это время, за которое тело совершает один полный оборот:

$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi}{\omega}$$

! Единица периода вращения в системе СИ  $[T] = 1 \text{ с}$ .

**Частота вращения  $n$**  — это физическая величина, численно равная числу оборотов, совершаемых телом за 1 секунду:

$$n = \frac{1}{T} = \frac{v}{2\pi R} = \frac{\omega}{2\pi}$$

! Единица частоты вращения в системе СИ  $[n] = 1 \text{ об/с} = 1 \text{ с}^{-1}$ .

Угловую скорость  $\omega$  можно выразить через  $T$  и  $n$ :

$$\omega = \frac{v}{R} = \frac{2\pi}{T} = 2\pi n$$

Центростремительное ускорение  $a_n$  можно выразить через  $\omega$  и  $n$ :

$$a_n = \frac{v^2}{R} = \omega^2 R = 4\pi^2 n^2 R = \frac{4\pi^2 R}{T^2}$$

Если точка за время  $t$  совершает  $N$  оборотов, то период  $T$  и частота  $n$  вращения определяются соотношениями

$$T = \frac{t}{N};$$

$$n = \frac{N}{t}$$



## ОСНОВЫ ДИНАМИКИ

**Динамика** — это раздел механики, изучающий движение тел в зависимости от причин (сил), которые его вызывают.

**Основная задача динамики** — определить закон движения тела, если известны приложенные силы и начальные условия.

**Обратная задача динамики** — определение законов взаимодействия тела друг с другом, если известен закон их движения.

**Инертность** — это свойство тел сохранять состояние покоя или равномерного прямолинейного движения.

Мерой инертности тела при поступательном движении является **инертная масса**.

Мерой гравитационных свойств тел является **гравитационная масса**.

Согласно **принципу эквивалентности** гравитационная и инертная массы равны.

! Принцип эквивалентности является обобщением экспериментальных фактов.

**Масса  $m$**  — это физическая величина, являющаяся количественной мерой инерционных и гравитационных свойств тел.

! Масса — величина скалярная. При скоростях движения много меньших скорости света в вакууме масса не зависит от скорости.

! Масса — величина **аддитивная**: масса тела равна сумме масс всех частей этого тела:

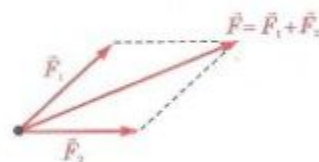
$$m = m_1 + m_2 + \dots + m_n.$$

! Единица массы в системе СИ  $[m] = 1 \text{ кг}$ .

**Сила  $\vec{F}$**  — векторная величина, характеризующая действие одного тела (или силового поля) на другое и вызывающая его ускорение и деформацию.

Векторная (геометрическая) сумма сил, действующих на тело, называется **равнодействующей силой  $\vec{F}$** .

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



! Единица силы в системе СИ  $[F] = 1 \text{ Н}$  (ньютон).

**Импульс  $\vec{p}$**  — векторная величина, численно равная произведению массы тела на вектор скорости его движения:

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

! Единица импульса в системе СИ  $[p] = 1 \text{ кг}\cdot\text{м/с}$ .



## ОСНОВЫ ДИНАМИКИ

## Законы Ньютона

**Первый закон Ньютона (закон инерции):** существуют такие системы отсчета, в которых всякое тело сохраняет состояние покоя или равномерного и прямолинейного движения до тех пор, пока под действием сил оно не будет выведено из этого состояния.

Системы отсчета, о которых идет речь в первом законе Ньютона, называются **инерциальными**.

Физический смысл первого закона Ньютона состоит в утверждении **существования инерциальных систем отсчета**.

Любая система отсчета, движущаяся относительно некоторой инерциальной системы прямолинейно и равномерно, будет также инерциальной.

Системы отсчета, по отношению к которым первый закон Ньютона не выполняется, называются **неинерциальными системами отсчета**.

Неинерциальные системы отсчета движутся относительно инерциальных систем с некоторым ускорением.

**Второй закон Ньютона (основной закон динамики):** ускорение, с которым движется тело, прямо пропорционально равнодействующей всех сил, действующих на тело, совпадает с ней по направлению и обратно пропорционально его массе:

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

Второй закон Ньютона можно сформулировать в следующем виде: изменение импульса тела  $\Delta \vec{p}$  за некоторое время  $\Delta t$  равно импульсу равнодействующей силы  $\vec{F} \Delta t$  за то же время:

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

или

$$m\vec{v} - m\vec{v}_0 = \vec{F} \Delta t.$$

Второй закон Ньютона позволяет решать основную задачу динамики. Поэтому его еще называют **основным уравнением динамики поступательного движения**.

! Второй закон Ньютона выполняется только в инерциальных системах отсчета.

**Третий закон Ньютона:** силы, с которыми два тела действуют друг на друга, равны по модулю и противоположны по направлению и направлены вдоль одной прямой:

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

! Третий закон Ньютона выполняется в инерциальных системах отсчета. Силы взаимодействия двух тел имеют одинаковую природу, но приложены к разным телам.



## ОСНОВЫ ДИНАМИКИ

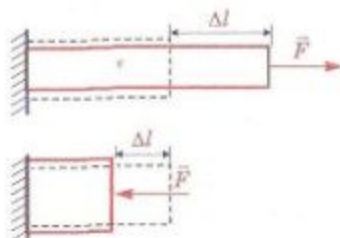
## Сила упругости

**Деформация** — это изменение формы и размеров тела под действием внешних сил. Деформации называют **упругими**, если после прекращения действия силы тело приобретает первоначальную форму и размеры. Если этого не происходит, то деформации называют **пластическими** (неупругими).

По характеру смещения частей тела друг относительно друга различают следующие деформации: **растяжения-сжатия**, **сдвига**, **кручения**, **изгиба**.

Деформации называются **однородными**, если все элементы тела деформируются одинаково. К однородным деформациям относятся деформации растяжения-сжатия и сдвига. К **неоднородным** деформациям относятся деформации изгиба и кручения.

**Закон Гука** (для упругой деформации растяжения-сжатия): сила упругости, возникающая при деформации тела, прямо пропорциональна величине абсолютного удлинения:



$$F_{\text{упр}} = k \Delta l,$$

где  $k$  — коэффициент жесткости;

$\Delta l = |l - l_0|$  — абсолютное удлинение (абсолютная деформация).

Согласно третьему закону Ньютона сила упругости равна по модулю и противоположна по направлению внешней силе  $\vec{F}$ , деформирующей тело ( $\vec{F}_{\text{упр}} = -\vec{F}$ ).

! Коэффициент жесткости зависит от материала тела, его формы и размеров.

! Единица коэффициента жесткости в СИ  $[k] = 1 \text{ Н/м}$ .

Закон Гука можно записать в следующем виде:

$$\frac{F_{\text{упр}}}{S} = E \frac{\Delta l}{l_0}, \text{ или } \sigma = E \epsilon,$$

где  $S$  — площадь поперечного сечения тела;

$\sigma = \frac{F_{\text{упр}}}{S}$  — механическое напряжение;

$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$  — относительное удлинение (относительная деформация);

$E$  — модуль Юнга.

! Модуль Юнга  $E$  является характеристикой упругих свойств вещества.

! Единица модуля Юнга в системе СИ  $[E] = 1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$ .

Коэффициент жесткости равен  $k = E \frac{S}{l_0}$ .



## ОСНОВЫ ДИНАМИКИ

## Сила трения

При перемещении одного тела относительно другого возникает явление **трения**. Различают **внешнее (сухое) и внутренне (вязкое) трения**. **Сухое трение** возникает при взаимодействии соприкасающихся твердых тел в отсутствии между ними смазки. **Вязкое трение** возникает при движении тел в жидкости или газе.

Сухое трение делится на: **трение покоя, трение скольжения и трение качения**.

Когда к телу прикладывают силу, но тело покоится, то говорят о возникновении **силы трения покоя**. Величина и направление силы трения покоя зависят от величины и направления приложенной силы.

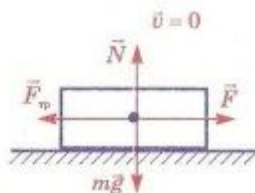
Сила трения покоя может изменяться от 0 до максимального значения  $F_{\text{тр}0}$ . Максимальная сила трения покоя определяется выражением

$$F_{\text{тр}0} = \mu_0 N,$$

где  $\mu_0$  — коэффициент трения покоя;  
 $N$  — сила нормальной реакции.

! Сила трения покоя всегда направлена вдоль поверхности соприкосновения двух тел и противодействует приложенной силе. Коэффициент трения покоя  $\mu_0$  зависит от материала и состояния (степени обработки) соприкасающихся поверхностей двух тел.

Если приложенная сила больше максимальной силы трения покоя  $F_{\text{тр}0}$ , то одно тело начинает скользить по поверхности другого. При этом возникает сила трения скольже-



ния. Сила трения скольжения всегда направлена в сторону, противоположную вектору скорости и определяется выражением

$$F_{\text{тр}} = \mu N,$$

где  $\mu$  — коэффициент трения скольжения;  
 $N$  — сила нормальной реакции.

! Коэффициент трения скольжения  $\mu$  зависит от материала и состояния соприкасающихся поверхностей двух тел, скорости их относительного движения. При малых скоростях коэффициент трения скольжения  $\mu$  можно считать постоянным.

При качении одного тела по поверхности другого возникает сила сопротивления движению, которую называют **силой трения качения**.

При качении без проскальзывания сила трения качения равна

$$F_{\text{тр.к}} = \mu_k \frac{N}{R},$$

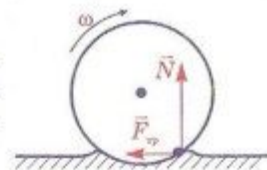
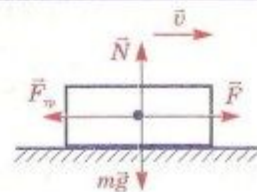
где  $\mu_k$  — коэффициент трения качения;  
 $R$  — радиус тела, которое катится.

При движении тел в жидких и газообразных средах возникает сила сопротивления движению, которую называют **силой вязкого трения**. При малых скоростях эта сила определяется выражением

$$\vec{F}_{\text{сопр}} = -\mu_c \vec{v},$$

где  $\mu_c$  — коэффициент вязкого трения.

! Коэффициент вязкого трения зависит от формы и размеров движущегося тела, от рода и состояния жидкости или газа.





## ОСНОВЫ ДИНАМИКИ

## Сила тяготения

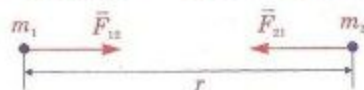
**Закон всемирного тяготения:** две любые материальные точки притягиваются друг к другу с силами, прямо пропорциональными произведению масс этих точек и обратно пропорциональными квадрату расстояния между ними:

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

где  $m_1$  и  $m_2$  — массы двух материальных точек;

$r$  — расстояние между ними;

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



! В записанной форме закон всемирного тяготения справедлив также для однородных тел сферической формы (например, шаров). В этом случае под  $r$  следует понимать расстояние между центрами тел.

Силы тяготения всегда являются силами притяжения и направлены вдоль прямой, проходящей через взаимодействующие тела. Силы тяготения не зависят от того, в какой среде находятся взаимодействующие тела. Гравитационное взаимодействие между телами осуществляется с помощью гравитационного поля.

На любое тело, расположенное вблизи поверхности Земли, действует сила тяготения. Эта сила в системе отсчета, связанной с Землей, называется силой тяжести.

$$F = mg,$$

где  $g$  — ускорение свободного падения.

Если не учитывать вращения Земли, то силу тяжести можно определить, используя закон всемирного тяготения:

$$F = mg = G \frac{mM_3}{(R_3 + h)^2},$$

где  $M_3$  — масса Земли;

$R_3$  — радиус Земли;

$h$  — высота над поверхностью Земли.

Ускорение свободного падения в этом случае зависит только от высоты  $h$  и определяется соотношением

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

Если  $h \ll R_3$  ( $R_3 \approx 6370 \text{ км}$ ), то ускорение свободного падения равно

$$g_0 = G \frac{M_3}{R_3^2} = 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

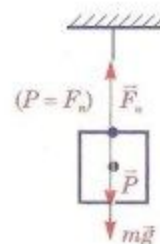
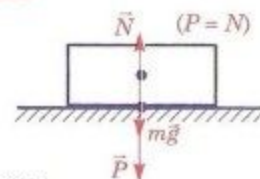
**Вес тела  $\vec{P}$**  — это сила, с которой тело, вследствие притяжения к Земле, действует на опору или подвес.

! Сила веса приложена к опоре или подвесу. Сила веса равна по величине и противоположна по знаку силе реакции опоры или подвеса.

! Вес тела в общем случае не равен силе тяжести.

Если вес тела  $P = 0$ , то говорят что оно находится в состоянии невесомости.

! Состояние невесомости наблюдается в любой системе, движущейся только под действием силы тяготения.



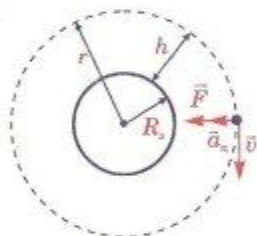


## ОСНОВЫ ДИНАМИКИ

## Движение искусственных спутников

Искусственными спутниками Земли являются тела, движущиеся по круговым или эллиптическим траекториям вокруг Земли. Спутник движется под действием силы тяготения, которая сообщает ему центростремительное ускорение.

Рассмотрим движение искусственного спутника Земли по круговой орбите радиусом  $r = R_3 + h$ .



Согласно второму закону Ньютона:

$$ma_y = F \Rightarrow m \frac{v^2}{r} = G \frac{mM_3}{r^2};$$

$$m \frac{v^2}{R_3 + h} = G \frac{mM_3}{(R_3 + h)^2};$$

$$v^2 = G \frac{M_3}{R_3 + h};$$

$$v = \sqrt{G \frac{M_3}{R_3 + h}}.$$

Линейная скорость спутника

$$v = \sqrt{G \frac{M_3}{R_3 + h}} = \sqrt{\frac{g_0 R_3^2}{R_3 + h}},$$

где  $g_0 = G \frac{M_3}{R_3^2} = 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ .

Угловая скорость спутника

$$\omega = \frac{v}{R_3 + h} = \sqrt{G \frac{M_3}{(R_3 + h)^3}} = \sqrt{\frac{g_0 R_3^2}{(R_3 + h)^3}}.$$

Период вращения спутника

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{(R_3 + h)^3}{GM_3}} = 2\pi \sqrt{\frac{(R_3 + h)^3}{g_0 R_3^2}}.$$

Частота вращения спутника

$$n = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{G \frac{M_3}{(R_3 + h)^3}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g_0 R_3^2}{(R_3 + h)^3}}.$$

**Первая космическая скорость** — это скорость, которую нужно сообщить телу вблизи поверхности планеты, чтобы оно стало искусственным спутником. Для Земли первая космическая скорость (в приближении  $h \ll R_3$ ):

$$v_1 = \sqrt{G \frac{M_3}{R_3}} = \sqrt{g R_3} = \sqrt{9,81 \cdot 6370 \cdot 10^3} = 7,9 \frac{\text{км}}{\text{с}}.$$



## ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ В МЕХАНИКЕ

**Механическая система** — это совокупность тел, взаимодействующих между собой посредством сил.

**Внутренние силы** — это силы взаимодействия между телами механической системы.

**Внешние силы** — это силы, действующие на тела механической системы со стороны тел, не входящих в рассматриваемую систему.

Система называется **замкнутой**, если на нее не действуют внешние силы (или их действие скомпенсировано).

**Импульс механической системы** — это векторная сумма импульсов тел, образующих эту систему:

$$\vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \dots + \vec{p}_n = m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 + \dots + m_n \vec{v}_n.$$

## Закон сохранения импульса

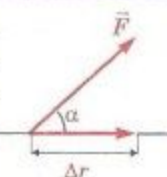
При любых взаимодействиях, происходящих в замкнутой системе тел, импульс системы не изменяется:

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \dots + \vec{p}_n = m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 + \dots + m_n \vec{v}_n = \text{const}.$$

! Закон сохранения импульса является фундаментальным законом природы.

## Работа

**Работа  $A$**  — скалярная физическая величина, численно равная произведению модуля силы на перемещение и на косинус угла между вектором силы и вектором перемещения:



$$A = F \cdot \Delta r \cdot \cos \alpha.$$

! Работа результирующей силы равна алгебраической сумме работ всех сил, действующих на тело.

! Единица работы в системе СИ  $[A] = 1 \text{ Дж}$ .

## Кинетическая энергия

**Кинетическая энергия тела  $K$**  — это энергия тела, обусловлена его движением:

$$K = \frac{mv^2}{2},$$

где  $m$  — масса тела;

$v$  — скорость тела.

! Кинетическая энергия тела зависит от выбора системы отсчета.

! Единица кинетической энергии в системе СИ  $[K] = 1 \text{ Дж}$ .

**Теорема об изменении кинетической энергии:** изменение кинетической энергии тела равно работе сил, вызывающих это изменение.

$$K_2 - K_1 = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} = A.$$



## ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ В МЕХАНИКЕ

## Потенциальная энергия

Потенциальная энергия тела  $\Pi$  — это энергия взаимодействия тел.

Силу называют **консервативной (потенциальной)**, если работа этой силы не зависит от формы траектории, а зависит только от начального и конечного положения.

Работа **консервативной** силы равна изменению потенциальной энергии, взятой с обратным знаком:

$$A = -(\Pi_2 - \Pi_1)$$

! Работа консервативной силы по замкнутому контуру всегда равна нулю

Потенциальная энергия тела, поднятого на некоторую высоту над поверхностью Земли:

$$\Pi = mgh$$

где  $h$  — высота, отсчитываемая от нулевого уровня (уровня, где потенциальная энергия считается равной нулю).

Потенциальная энергия упруго деформированного тела

$$\Pi = \frac{k(\Delta l)^2}{2}$$

где  $k$  — коэффициент жесткости тела;  
 $\Delta l$  — абсолютная деформация (абсолютное удлинение) тела.

! Единица потенциальной энергии в системе СИ  
 $[\Pi] = 1 \text{ Дж}$

## Полная механическая энергия

Полная механическая энергия  $E$  — это сумма кинетической и потенциальной энергий тела (системы):

$$E = K + \Pi$$

Если на тело действуют силы тяжести и упругости, то полная механическая энергия такого тела определяется выражением

$$E = \frac{mv^2}{2} + mgh + \frac{k(\Delta l)^2}{2}$$

! Единица механической энергии в системе СИ  $[E] = 1 \text{ Дж}$

## Закон сохранения полной механической энергии

Закон сохранения полной механической энергии:

если на тела системы действуют **только консервативные силы** (силы тяжести, упругости, электростатические), то **полная механическая энергия с течением времени не изменяется**:

$$E_1 = E_2 = \text{const}, \text{ или } K_1 + \Pi_1 = K_2 + \Pi_2 = \text{const}$$

Закон изменения полной механической энергии:

если на тела системы действуют кроме **консервативных сил** также и **неконсервативные силы** (силы трения, сопротивления движению), то **изменение полной механической энергии равно работе неконсервативных сил**:

$$E_2 - E_1 = A_{\text{неконс}}, \text{ или } (K_2 + \Pi_2) - (K_1 + \Pi_1) = A_{\text{неконс}}$$

! Законы сохранения и изменения полной механической энергии являются частными случаями всеобщего закона сохранения и превращения энергии.



## ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ В МЕХАНИКЕ

## Мощность

Величину, которая характеризует быстроту совершения работы, называют **мощностью**.

**Средняя мощность**  $\langle P \rangle$  — это скалярная физическая величина, равная отношению работы  $A$  к промежутку времени  $t$ , в течение которого эта работа производится:

$$\langle P \rangle = \frac{A}{t}.$$

Если на тело действует **постоянная сила**  $F$ , то средняя мощность равна

$$\langle P \rangle = F \langle v \rangle \cos \alpha,$$

где  $\langle v \rangle$  — средняя скорость тела;

$\alpha$  — угол между направлениями (векторами) силы и скорости тела.

**Мгновенная мощность**  $P$  — мощность в данный момент времени:

$$P = F \cdot v \cdot \cos \alpha,$$

где  $v$  — модуль мгновенной скорости тела;

$\alpha$  — угол между направлениями (векторами) силы и скорости тела.

! Единица мощности в системе СИ  $[P] = 1$  Вт (ватт).

## Коэффициент полезного действия

Каждое устройство (машина) характеризуется величиной, которая показывает, насколько эффективно используется подводимая к нему энергия. Эта величина называется **коэффициентом полезного действия (КПД)**.

**Коэффициентом полезного действия** называют отношение полезной работы  $A_{\text{пол}}$ , совершенной машиной за некоторый промежуток времени, ко всей затраченной работе  $A_{\text{затр}}$  (подведенной энергии  $E$ ) за тот же промежуток времени:

$$\eta = \frac{A_{\text{пол}}}{A_{\text{затр}}} \cdot 100\%,$$

или

$$\eta = \frac{A_{\text{пол}}}{E} \cdot 100\%.$$

**Коэффициентом полезного действия** также называют отношение полезной мощности к затраченной мощности:

$$\eta = \frac{P_{\text{пол}}}{P_{\text{затр}}} \cdot 100\%.$$

! КПД устройства (машины) не может быть больше единицы. В реальных машинах всегда существуют неизбежные потери энергии на работу против сил трения или сопротивления, также немеханические причины потери энергии. Поэтому КПД реальных устройств (машин) всегда меньше единицы.



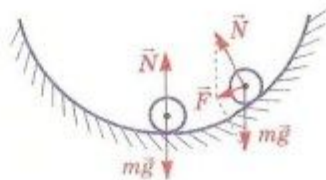
## ЭЛЕМЕНТЫ СТАТИКИ

**Статика** — раздел механики, в котором изучают условия равновесия тел.

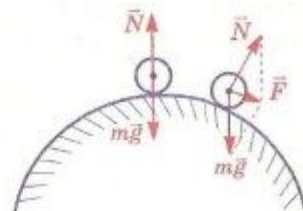
**Равновесие тела** — это такое его положение, которое сохраняется без дополнительных воздействий.

Равновесие бывает **устойчивым**, **неустойчивым** и **безразличным**.

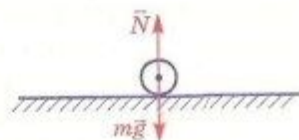
Если при выведении тела из положения равновесия путем бесконечно малого перемещения равнодействующая сил, действующих на тело, вернет тело обратно в положение равновесия, то равновесие будет **устойчивым**.



Если при выведении тела из положения равновесия путем бесконечно малого перемещения равнодействующая будет выводить тело из положения равновесия, то равновесие будет **неустойчивым**.



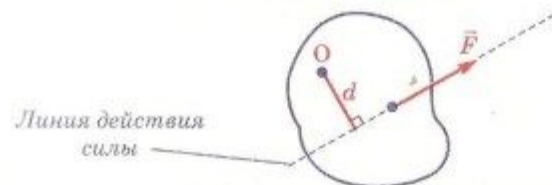
Если при перемещении тела условия равновесия не изменятся, то равновесие называют **безразличным**.



## Момент силы

Если тело может вращаться около неподвижной оси, то для описания его движения или равновесия вводится понятие момента силы. **Моментом силы  $M$**  относительно точки  $O$  называется произведение модуля силы  $F$  на ее плечо  $d$ :

$$M = Fd$$



Плечом силы  $d$  называется кратчайшее расстояние от центра вращения  $O$  (оси) до линии действия силы.

Линия действия силы — это линия, вдоль которой действуют силы.

! Моменты сил, стремящихся вызывать вращение тел по часовой стрелке, обычно принято считать положительными, а против часовой стрелки — отрицательными.

! Единица момента силы в системе СИ  $[M] = 1 \text{ Н} \cdot \text{м}$ .

## Условие равновесия тела, которое может двигаться поступательно

Тело находится в равновесии, если векторная сумма всех сил действующих на тело, равна нулю:

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n = 0$$



## ЭЛЕМЕНТЫ СТАТИКИ

Условие равновесия тела,  
которое может вращаться  
относительно неподвижной оси

Тело, имеющее неподвижную ось вращения, находится в равновесии, если алгебраическая сумма моментов всех сил, действующих на тело, относительно этой оси равна нулю:

$$M_1 + M_2 + \dots + M_n = 0.$$

- ! Применяя условие равновесия необходимо помнить, что моменты сил, вращающие тело по часовой стрелке, берутся со знаком «+», а моменты сил, вращающие тело против часовой стрелки, — со знаком «-».
- ! Если в задаче ось вращения не указана, то уравнение моментов сил можно составлять относительно любой оси.

Условие равновесия тела,  
которое может двигаться поступательно  
и вращаться

Если тело может двигаться поступательно и вращаться, то для его равновесия необходимо выполнение одновременно условий

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n = 0; \\ M_1 + M_2 + \dots + M_n = 0.$$

Центр тяжести.  
Центр масс

Центром тяжести тела называют воображаемую точку, в которой приложена сила тяжести, действующая на тело.

Центр масс тела — это воображаемая точка  $C$ , положение которой характеризует распределение массы тела и координата которой определяется выражением

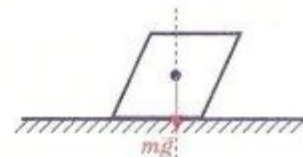
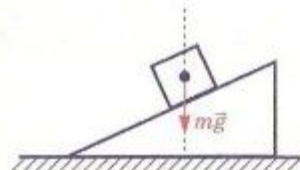
$$x_C = \frac{x_1 m_1 + x_2 m_2 + \dots + x_n m_n}{m_1 + m_2 + \dots + m_n},$$

где  $m_1, m_2, \dots, m_n$  и  $x_1, x_2, \dots, x_n$  — соответственно массы и координаты частей тела.

- ! Если поле силы тяжести считать однородным, то центр масс и центр тяжести будут **совпадать**.
- ! Центр масс (центр тяжести) симметричных тел находится в их **геометрическом центре**.

## Равновесие тела на опоре

Тело на опоре будет находиться в равновесии, если вертикальная линия, проходящая через его центр тяжести, не выходит за пределы площади опоры этого тела.





## ПРОСТЫЕ МЕХАНИЗМЫ

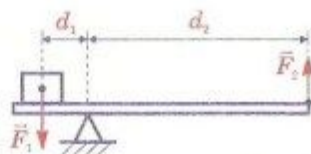
**Простыми механизмами** называются устройства, позволяющие совершать работу без применения источников немеханической энергии.

К ним относятся: **рычаг**, **наклонная плоскость**, **блок** и др. С их помощью можно изменять модуль силы (рычаг, наклонная плоскость, подвижный блок) и направление силы (блок).

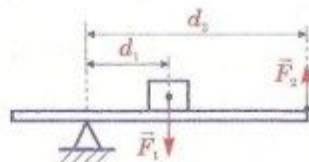
### Рычаг

**Рычаг** — тело, имеющее ось вращения, к которому приложены силы, поворачивающие его относительно оси вращения. Рычаг позволяет меньшей силой уравновесить большую силу. Рычаги бывают первого и второго рода.

Если опора располагается между точками приложения силы, то это **рычаг первого рода**.



Если обе силы приложены с одной стороны опоры, то это **рычаг второго рода**.



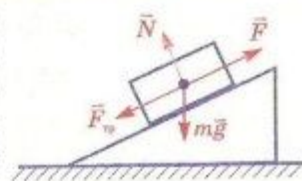
Условием равновесия рычага является равенство значений моментов сил  $M_1 = F_1 d_1$  и  $M_2 = F_2 d_2$ , приложенных к нему:

$$F_1 d_1 = F_2 d_2,$$

где  $d_1$  и  $d_2$  — плечи сил  $F_1$  и  $F_2$  соответственно.

### Наклонная плоскость

**Наклонная плоскость** применяется для подъема груза на некоторую высоту. Она дает выигрыш в силе во столько раз (без учета сил трения), во сколько раз длина  $l$  наклонной плоскости больше ее высоты  $h$ .



Коэффициент полезного действия наклонной плоскости при наличии сил трения

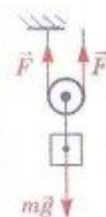
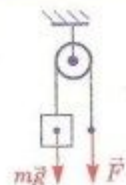
$$\eta = \frac{1}{1 + \mu \cdot \operatorname{ctg} \alpha},$$

где  $\mu$  — коэффициент трения;

$\alpha$  — угол наклона плоскости к горизонту.

### Блок

**Неподвижный блок** — это небольшое колесо, укрепленное на неподвижной оси. Неподвижный блок изменяет направление силы, но не изменяет ее величину.



В случае **подвижного блока** сила, необходимая для равномерного подъема груза (без учета трения), в 2 раза меньше его силы тяжести.

### Золотое правило механики

С помощью простого механизма **нельзя получить выигрыш в работе**. Во сколько раз выигрываем в силе, во столько раз проигрываем в расстоянии.



## ЭЛЕМЕНТЫ ГИДРОСТАТИКИ

## Давление

**Давление  $p$**  — скалярная физическая величина, численно равная отношению величины силы  $F$ , действующей перпендикулярно к поверхности, к площади  $S$  этой поверхности:

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

! Единица давления в системе СИ  $[p] = 1 \text{ Па}$  (паскаль).

Сила давления определяется соотношением

$$F = pS.$$

## Гидростатическое давление

**Гидростатическое давление** — это давление, действующее на площадку, находящуюся в жидкости, и обусловленное силой тяжести жидкости:

$$p = \rho gh,$$

где  $\rho$  — плотность жидкости;

$g$  — ускорение свободного падения;

$h$  — высота столба жидкости, расположенной над площадкой.



! Гидростатическое давление зависит только от рода жидкости и высоты столба жидкости над площадкой.

! Гидростатическое давление на заданной глубине  $h$  в жидкости не зависит от ориентации площадки.

Гидростатическое давление на дно сосуда равно

$$p_d = \rho gh,$$

где  $h$  — высота уровня жидкости в сосуде.

Сила гидростатического давления, действующая на дно сосуда

$$F_d = \rho gh S_d,$$

где  $S_d$  — площадь дна сосуда.

Гидростатическое давление жидкости на боковую стенку сосуда

$$p_b = \frac{\rho gh}{2},$$

где  $h$  — высота уровня жидкости в сосуде.

Сила гидростатического давления, действующая на боковую поверхность сосуда:

$$F_b = \frac{1}{2} \rho gh S_b,$$

где  $S_b$  — площадь боковой поверхности сосуда.

## Закон Паскаля

**Закон Паскаля:** жидкости и газы передают оказываемое на них давление по всем направлениям без изменения в любую точку жидкости или газа.

Согласно закону Паскаля давление в сосуде с жидкостью на глубине  $h$  равно сумме внешнего атмосферного и гидростатического давлений:

$$p = p_{\text{атм}} + \rho gh.$$

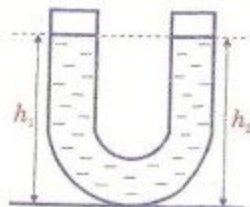


## ЭЛЕМЕНТЫ ГИДРОСТАТИКИ

## Сообщающиеся сосуды

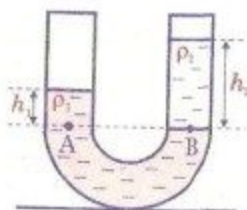
Сосуды, соединенные в своей нижней части, называются **сообщающимися**.

Если в сообщающихся сосудах находится однородная жидкость, то уровни жидкости в них будут одинаковыми ( $h_1 = h_2$ ).



! Уровень поверхности однородной жидкости в сообщающихся сосудах не зависит от формы сосудов.

Если в сообщающиеся сосуды налить две разнородные несмешивающиеся жидкости с плотностями  $\rho_1 \neq \rho_2$ , то жидкость с большей плотностью опустится вниз и вытеснит жидкость с меньшей плотностью. При условии равновесия гидростатические давления в обоих коленах на выбранном уровне **AB** равны, т.е.



$$\rho_1 g h_1 + p_{\text{атм}} = \rho_2 g h_2 + p_{\text{атм}} ;$$

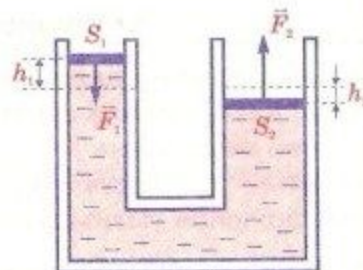
$$\rho_1 g h_1 = \rho_2 g h_2 ;$$

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1}$$

## Гидравлический пресс

Гидравлический пресс представляет собой два цилиндрических сообщающихся сосуда, заполненных жидкостью (водой или маслом) и закрытых поршнями различной площади.

Принцип действия гидравлического пресса основан на законе Паскаля и свойстве несжимаемости жидкости.



По **закону Паскаля** давление, создаваемое внешней силой  $F_1$  на поршень сечением  $S_1$ , передается без изменения его величины на поршень сечением  $S_2$ :

$$p_1 = p_2 \Rightarrow \frac{F_1}{S_1} = \frac{F_2}{S_2} \Rightarrow F_2 = F_1 \frac{S_2}{S_1} .$$

Сила давления  $F_2$  второго поршня во столько раз больше силы давления первого, во сколько раз площадь второго поршня больше площади первого.

Из свойства **несжимаемости** жидкости следует, что объем жидкости  $V_1$ , вытесненный первым поршнем, равен объему жидкости  $V_2$ , прибывшему под вторым поршнем:

$$V_1 = V_2 \Rightarrow h_1 S_1 = h_2 S_2 \Rightarrow h_2 = h_1 \frac{S_1}{S_2} .$$

Гидравлический пресс не дает выигрыша в работе: во сколько раз выигрываем в силе, в столько раз проигрываем в расстоянии.

! Гидравлические машины также используются в домкратах для подъема грузов, в тормозных системах и др.



## ЭЛЕМЕНТЫ ГИДРОСТАТИКИ

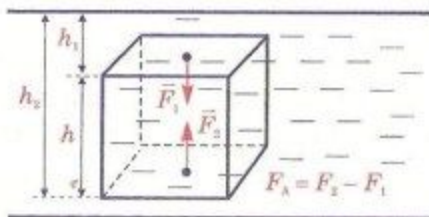
## Атмосферное давление

**Атмосферное давление** обусловлено силой тяжести воздуха, находящегося в атмосфере. Атмосферное давление на уровне моря равно  $p_{\text{атм}} = 1,01325 \cdot 10^5 \text{ Па}$ . С увеличением высоты  $h$  плотность воздуха, а соответственно и атмосферное давление уменьшаются.

! Давление также измеряют в несистемных единицах — атмосферах ( $1 \text{ атм} \equiv 10^5 \text{ Па}$ ) или мм рт. ст. ( $1 \text{ мм рт. ст.} \equiv 133 \text{ Па}$ ).

## Закон Архимеда

Зависимость давления в жидкости (или в газе) от высоты приводит к возникновению выталкивающей силы, действующей на любое тело, погруженное в жидкость (или газ). Эту силу называют **силой Архимеда**.



**Закон Архимеда:** на погруженное в жидкость (или газ) тело действует выталкивающая сила, равная силе тяжести жидкости (или газа), вытесненной этим телом:

$$F_A = \rho_{\text{ж}} g V_{\text{п}},$$

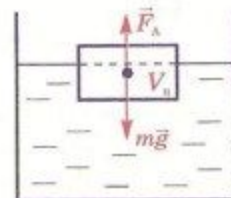
где  $\rho_{\text{ж}}$  — плотность жидкости;

$V_{\text{п}}$  — объем погруженной части тела.

## Условия плавания тела

На неподвижные тела, находящиеся в жидкости или газе, действуют две противоположно направленные силы: **сила тяжести**  $mg$  и **сила Архимеда**  $F_A$ .

- 1) Если  $F_A < mg$ , то тело тонет.
- 2) Если  $F_A = mg$ , то тело будет неподвижным в любом месте объема жидкости или газа.
- ! В этом случае наблюдается условие безразличного равновесия.
- 3) Если  $F_A > mg$ , то тело всплывает. Всплывающее тело будет частично выступать над поверхностью, поэтому объем погруженной части тела будет уменьшаться и, следовательно, будет уменьшаться сила Архимеда.



Движение всплывающего тела прекратится при достижении условия

$$mg = F_A \Rightarrow mg = \rho_{\text{ж}} g V_{\text{п}},$$

где  $V_{\text{п}}$  — объем погруженной части тела.

! Эти условия также справедливы для воздушных шаров и дирижаблей.



## ЭЛЕМЕНТЫ ГИДРОДИНАМИКИ

Движение жидкостей называется **течением**, а совокупность частиц движущейся жидкости — **поток**ом.

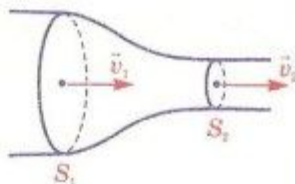
**Идеальная жидкость** — это жидкость, в которой отсутствует внутреннее трение.

Жидкость называется **несжимаемой**, если ее плотность во всех сечениях струи одинакова ( $\rho = \text{const}$ ).

### Уравнение неразрывности для несжимаемой жидкости

Произведение скорости течения несжимаемой жидкости на поперечное сечение трубки тока есть величина постоянная для данной трубки тока:

$$S_1 v_1 = S_2 v_2 = \text{const.}$$



### Уравнение Бернулли

Для установившегося течения идеальной несжимаемой жидкости справедливо уравнение

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

где  $\rho gh$  — гидростатическое давление;  $\frac{\rho v^2}{2}$  — динамическое давление,  $p$  — статическое давление.

! С энергетической точки зрения давление  $p$  есть работа внешних сил, совершаемая над единицей объема жидкости;  $\rho gh$  и  $\frac{\rho v^2}{2}$  — потенциальная и кинетическая энергии жидкости, заключенной в этом объеме.

# ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ



## ЭЛЕКТРОСТАТИКА

**Электродинамика** — это раздел физики, изучающий электромагнитное взаимодействие.

**Электростатика** — это раздел физики, изучающий взаимодействие неподвижных электрических зарядов и электростатические поля, создаваемые такими зарядами.

**Электрический заряд** — скалярная физическая величина, являющаяся количественной мерой электромагнитных взаимодействий.

! Единица электрического заряда в системе СИ  $[q] = 1 \text{ Кл}$  (кулон).

## Свойства электрического заряда

Существуют электрические заряды двух типов: **положительные** и **отрицательные**.

В обычных условиях тела содержат одинаковое количество положительных и отрицательных зарядов. Такое тело является **электрически нейтральным**.

На теле можно создать избыток зарядов одного знака, т.е. наэлектризовать его.

**Электризация** — это явление, сопровождающееся перераспределением зарядов на телах.

! Простейший способ — электризация тел трением. Например, на поверхности эбонита, потертого о мех, возникает отрицательный заряд, а на поверхности меха — положительный. На поверхности стекла, потертого о шелк, возникает положительный заряд, а на поверхности шелка — отрицательный.

Одноименные заряды **отталкиваются**, а разноименные заряды **притягиваются**.

Существует **элементарный заряд**  $e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ . Носителями элементарных зарядов являются электроны ( $-e$ ) и протоны ( $+e$ ).

! У любого заряженного тела заряд по величине не может быть меньше элементарного.

Электрический заряд **дискретен**, т.е. электрический заряд любого тела состоит из целого числа положительных и отрицательных элементарных зарядов:

$$q = N_+ e - N_- e,$$

где  $N_+$  и  $N_-$  — числа соответственно положительных и отрицательных элементарных зарядов.

Электрический заряд **инвариантен**, т.е. значение электрического заряда не зависит от скорости его движения (значение заряда не изменяется при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой).

**Точечный заряд** — это заряженное тело, размерами которого в условиях данной задачи можно пренебречь.

## Закон сохранения электрического заряда

Алгебраическая сумма зарядов тел и частиц, образующих **электрически изолированную систему**, не изменяется при любых процессах, происходящих в этой системе:

$$q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n = \sum_{i=1}^n q_i = \text{const}.$$

**Электрически изолированная система** — это система, которая не обменивается зарядами с внешними телами.



## ЭЛЕКТРОСТАТИКА

### Закон Кулона

Взаимодействие точечных электрических зарядов подчиняется закону Кулона.

**Закон Кулона:** силы, с которыми взаимодействуют два неподвижных точечных заряда, прямо пропорциональны произведению величин этих зарядов, обратно пропорциональны квадрату расстояния между ними и направлены вдоль прямой соединяющей эти заряды.

Величина силы взаимодействия зависит от среды, в которой находятся заряды.

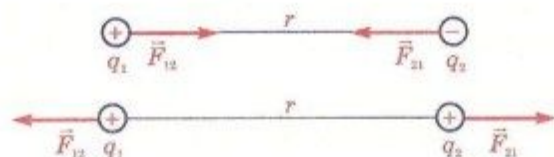
Величина каждой из сил определяется выражением

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1||q_2|}{\epsilon r^2} = k \frac{|q_1||q_2|}{\epsilon r^2},$$

где  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость среды (для вакуума  $\epsilon = 1$ );

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2} \text{ — электрическая постоянная;}$$

$$\text{коэффициент } k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}.$$



! Закон Кулона справедлив также для заряженных тел сферической формы, заряды которых распределены равномерно по объему или по поверхности этих тел.

### Электрическое поле

**Электрическое поле** — это особый вид материи, посредством которой осуществляется взаимодействие заряженных тел.

! Электрическое поле порождается электрическими зарядами и обнаруживается по действию на них.

Поле, создаваемое неподвижными электрическими зарядами, называют **электростатическим полем**.

Для исследования электрического поля используют **пробный заряд**  $q_0$ . Он должен быть **малым по величине**, чтобы собственным полем не искажать исследуемое поле, и принадлежать **телу малых размеров**, чтобы можно было исследовать поле в малых областях пространства. Для удобства пробный заряд условились считать **положительным**.

Электрическое поле в каждой точке пространства характеризуется напряженностью  $\vec{E}$  и потенциалом  $\phi$ .

### Напряженность электрического поля

**Напряженность электрического поля** — это силовая характеристика поля.

**Напряженность  $\vec{E}$**  — это векторная физическая величина, равная отношению силы, с которой поле действует на точечный положительный (пробный) заряд, помещенный в данную точку поля, к величине этого заряда:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}.$$

! Единица напряженности в системе СИ  $[E] = 1 \text{ Н/Кл} = 1 \text{ В/м}$ .

Электрическое поле называется **однородным**, если в любой точке его напряженность одинакова по величине и направлению.



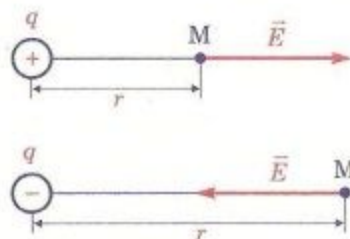
## ЭЛЕКТРОСТАТИКА

### Напряженность электрического поля точечного заряда

Напряженность  $E$  поля точечного заряда  $q$  на расстоянии  $r$  от него определяется соотношением

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q|}{r^2} = k \frac{|q|}{r^2}.$$

Если  $q > 0$ , то вектор  $\vec{E}$  в каждой точке поля направлен от заряда по радиальным линиям, а если  $q < 0$  — к заряду по радиальным линиям.



### Принцип суперпозиции электрических полей

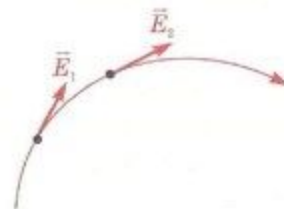
**Принцип суперпозиции:** если поле создается системой зарядов, то его напряженность  $\vec{E}$  в данной точке равна векторной сумме напряженностей полей, создаваемых в этой точке каждым из зарядов системы в отдельности:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots + \vec{E}_n = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i.$$

### Линии напряженности электрического поля

Электрическое поле графически изображают с помощью линий напряженности (силовых линий).

**Линии напряженности** — это направленные линии, касательные к которым в каждой точке пространства совпадают по направлению с вектором напряженности.

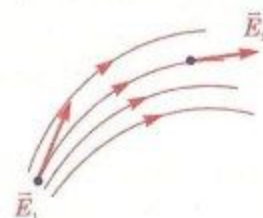


Линии напряженности начинаются на положительных зарядах и заканчиваются на отрицательных зарядах.

Через каждую точку поля проходит только одна линия напряженности, поэтому линии напряженности не пересекаются.

Чем гуще линии напряженности, тем больше величина напряженности электрического поля.

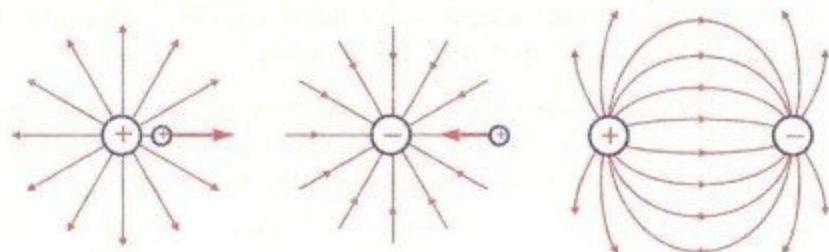
Густота линий напряженности пропорциональна модулю напряженности  $\vec{E}$ .





## ЭЛЕКТРОСТАТИКА

### Графическое представление электростатических полей

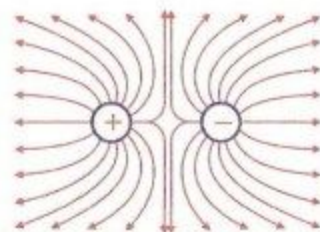


Электрическое поле точечного положительного заряда

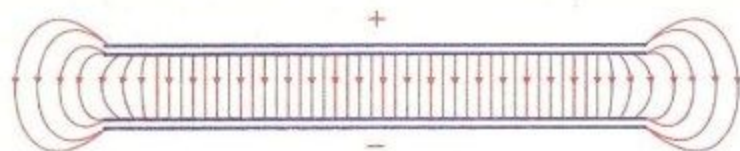
Электрическое поле точечного отрицательного заряда

Электрическое поле двух точечных разноименных зарядов

Электрическое поле двух точечных одноименных (положительных) зарядов



Электрическое поле плоского конденсатора



! В пространстве между обкладками плоского конденсатора электрическое поле является однородным.

### Потенциал электрического поля

Потенциал электрического поля — это энергетическая характеристика поля.

Потенциал  $\varphi$  — это скалярная физическая величина, равная отношению потенциальной энергии точечного положительного (пробного) заряда  $q_0$ , помещенного в данную точку поля, к величине этого заряда:

$$\varphi = \frac{W}{q_0}$$

! Единица потенциала в системе СИ  $[\varphi] = 1 \text{ Дж/Кл} = 1 \text{ В}$  (вольт).

### Потенциал электрического поля точечного заряда

Потенциал  $\varphi$  поля точечного заряда  $q$  на расстоянии  $r$  от него определяется соотношением

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{\epsilon r} = k \frac{q}{\epsilon r}$$

Если  $q > 0$ , то потенциал его поля **положительный** ( $\varphi > 0$ ).  
Если  $q < 0$ , то потенциал **отрицательный** ( $\varphi < 0$ ).

### Потенциальная энергия взаимодействия двух точечных зарядов

Потенциальная энергия  $W$  взаимодействия двух точечных зарядов  $q_1$  и  $q_2$ , находящихся на расстоянии  $r$  друг от друга, определяется выражением

$$W = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_2}{r} = k \frac{q_1 q_2}{r}$$



## ЭЛЕКТРОСТАТИКА

### Принцип суперпозиции для потенциалов

**Принцип суперпозиции для потенциалов:** если поле создается системой зарядов, то его потенциал  $\varphi$  в данной точке равен алгебраической сумме потенциалов полей, создаваемых в этой точке каждым из зарядов системы в отдельности:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \dots + \varphi_n = \sum_{i=1}^n \varphi_i.$$

### Эквипотенциальные поверхности

**Эквипотенциальные поверхности** — это геометрическое место точек поля, имеющих одинаковый потенциал  $\varphi$ . Эти поверхности удовлетворяют условию

$$\varphi = \text{const}.$$

Электрические поля графически можно также представлять с помощью эквипотенциальных поверхностей.

Через каждую точку поля проходит только **одна** линия напряженности и **одна** эквипотенциальная поверхность.

В каждой точке поля линия напряженности и эквипотенциальная поверхность **взаимно перпендикулярны**.



### Работа электростатического поля по перемещению заряда

Работа, совершаемая силами электростатического поля при перемещении любого заряда  $q$  из точки 1 в точку 2, определяется выражением

$$A_{12} = q(\varphi_1 - \varphi_2) = q\Delta\varphi = qU,$$

где  $\varphi_1 - \varphi_2 = \Delta\varphi = U$  — разность потенциалов (электрическое напряжение) между точками 1 и 2.

! Единица разности потенциалов (напряжения) в системе СИ  $[\Delta\varphi] = [U] = 1 \text{ В}$ .

! Работа сил электростатического поля при движении заряда по любой замкнутой траектории = 0. Поэтому сила электростатического поля является консервативной, а электростатическое поле является потенциальным полем.

При движении зарядов под действием только сил электростатического поля **теорема об изменении кинетической энергии** будет иметь следующий вид:

$$\frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} = q(\varphi_1 - \varphi_2),$$

где  $m$  — масса частицы (заряда);

$v_1$  и  $v_2$  — скорость частицы (заряда) в начальной и конечной точках соответственно;

$\varphi_1 - \varphi_2$  — разность потенциалов между этими точками.

Если полагать, что на бесконечности поле отсутствует, т.е. потенциал поля на бесконечности равен нулю, то **потенциал** поля можно определить следующим образом:

$$A_{1\infty} = q \cdot \varphi_1 \Rightarrow \varphi = \frac{A_{1\infty}}{q}.$$

**Потенциал** электростатического поля в данной точке численно равен работе, которую совершают сила поля при перемещении единичного положительного заряда из данной точки на бесконечность.



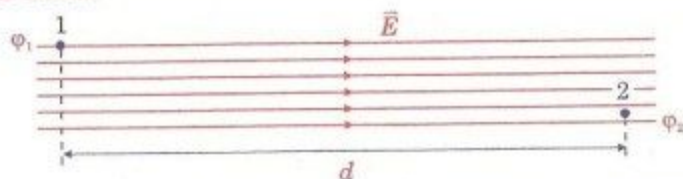
## ЭЛЕКТРОСТАТИКА

## Связь между напряжением и напряженностью для однородного электростатического поля

Связь между напряжением (разностью потенциалов) и напряженностью для однородного электростатического поля выражается формулой

$$E = \frac{U}{d} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d},$$

где  $U = \varphi_1 - \varphi_2$  — напряжение (разность потенциалов) между точками поля, находящимися одна от другой на расстоянии  $d$ , отсчитываемым вдоль линии напряженности поля.



## Электростатическое поле, создаваемое проводящей заряженной сферой или шаром

Если проводящей сфере (шару) сообщить некоторый заряд, то заряд будет равномерно распределяться по всей поверхности. Распределенный заряд можно охарактеризовать поверхностной плотностью заряда  $\sigma$ :

$$\sigma = \frac{q}{S},$$

где  $q$  — заряд, равномерно распределенный по поверхности площадью  $S$ . Для сферы (шара) площадь поверхности  $S = 4\pi R^2$  ( $R$  — радиус сферы (шара)).

! Единица поверхностной плотности заряда в системе СИ  $[\sigma] = 1 \text{ Кл/м}^2$ .

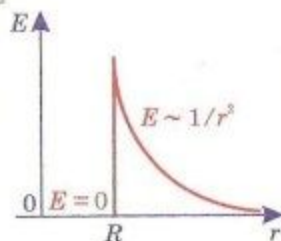
Напряженность  $E$  поля, создаваемого заряженной проводящей сферой (шаром), на расстоянии  $r$  от центра сферы (шара):

Если  $r < R$ , то  $E = 0$ .

! Напряженность электростатического поля внутри проводящей сферы или шара равна 0.

Если  $r \geq R$ , то  $E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q|}{\epsilon r^2} = k \frac{|q|}{\epsilon r^2}$ .

График зависимости напряженности поля, создаваемого заряженной проводящей сферой (шаром), от расстояния  $r$  до центра сферы (шара):



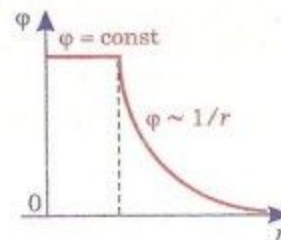
Потенциал  $\varphi$  поля, создаваемого заряженной проводящей сферой (шаром), на расстоянии  $r$  от центра сферы (шара):

Если  $r \leq R$ , то  $\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{\epsilon R} = k \frac{q}{\epsilon R} = \text{const}$  — потенциал сферы (шара).

! Потенциал электростатического поля внутри проводящей сферы (шара) постоянен и равен потенциалу на поверхности сферы (шара).

Если  $r > R$ , то  $\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{\epsilon r} = k \frac{q}{\epsilon r}$ .

График зависимости потенциала поля, создаваемого заряженной проводящей сферой (шаром), от расстояния  $r$  до центра сферы (шара)

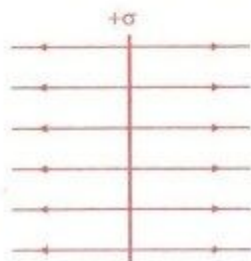




## ЭЛЕКТРОСТАТИКА

### Электростатическое поле, создаваемое бесконечной однородно заряженной плоскостью

Напряженность  $E$  поля, создаваемого бесконечной однородно заряженной плоскостью, одинакова по модулю и перпендикулярно к плоскости:



$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon\epsilon_0} = \frac{q}{2\epsilon\epsilon_0 S},$$

где  $\sigma = \frac{q}{S}$  — поверхностная плотность заряда плоскости;

$\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость среды, в которой находится плоскость.

! Для плоскости конечных размеров указанная выше формула будет справедлива только для точек, расстояние от которых до плоскости значительно меньше, чем расстояния от них до краев плоскости.

### Емкость уединенного проводника

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

Электрическая емкость (емкость)  $C$  уединенного проводника — это скалярная физическая величина, численно равная заряду, который надо сообщить проводнику, чтобы изменить его потенциал на единицу:

$$C = \frac{q}{\phi}$$

! Единица емкости в системе СИ  $[C] = 1 \text{ Кл/В} = 1 \text{ Ф (фарад)}$ .

Емкость характеризует свойства проводников накапливать и сохранять электрические заряды и связанное с этими зарядами поле.

Емкость проводника **зависит** от его формы и размеров, диэлектрической проницаемости среды, в которой он находится, а также от наличия вблизи него других проводников.

Емкость проводника **не зависит** от материала проводника, форм и размеров полостей внутри проводника, от заряда на нем и его потенциала.

Емкость уединенного шара радиуса  $R$ , находящегося в однородном диэлектрике с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ :

$$C = 4\pi\epsilon\epsilon_0 R$$



## ЭЛЕКТРОСТАТИКА

## Електроемкость конденсатора

**Конденсатор** — это система двух проводников, разделенных слоем диэлектрика, толщина которого мала по сравнению с размерами проводников. Проводники, образующие конденсатор, называются его **обкладками**. Обкладки конденсатора заряжены равными по величине и противоположными по знаку зарядами.

По форме обкладок конденсаторы делятся на **плоские**, **сферические** и **цилиндрические**.

По типу используемого диэлектрика конденсаторы бывают **воздушными**, **электролитическими**, **керамическими**, **бумажными**, **слюдяными** и др.

Конденсаторы бывают также **постоянной** и **переменной** емкости.

**Электрическая емкость (электроемкость)  $C$  конденсатора** — это скалярная физическая величина, равная отношению заряда конденсатора к разности потенциалов между его обкладками:

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{q}{U}$$

! Под зарядом конденсатора понимают модуль заряда одной из его обкладок.

## Плоский конденсатор

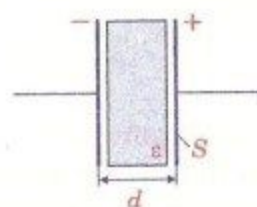
Електроемкость плоского конденсатора

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

где  $S$  — площадь одной из обкладок (пластин) конденсатора;

$d$  — расстояние между обкладками;

$\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость диэлектрика.

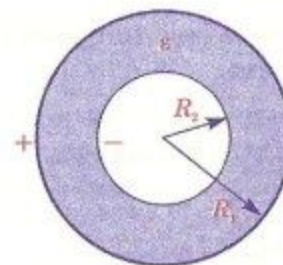


## Сферический конденсатор

Електроемкость сферического конденсатора

$$C = \frac{4\pi\epsilon\epsilon_0 R_1 R_2}{R_1 - R_2}$$

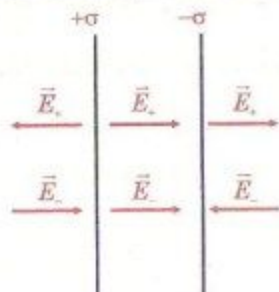
где  $R_1$  и  $R_2$  — радиусы внутренней и внешней обкладок.





## ЭЛЕКТРОСТАТИКА

### Напряженность электрического поля плоского конденсатора



Напряженность электрического поля между обкладками плоского конденсатора определяется соотношением

$$E = E_+ + E_- = 2E_+ = \frac{\sigma}{2\epsilon\epsilon_0} + \frac{\sigma}{2\epsilon\epsilon_0} = \frac{\sigma}{\epsilon\epsilon_0} = \frac{q}{\epsilon\epsilon_0 S},$$

где  $E_+$  и  $E_-$  — напряженность полей, создаваемых положительно и отрицательно заряженными обкладками конденсатора соответственно;

$\sigma = \frac{q}{S}$  — поверхностная плотность заряда на обкладке конденсатора;

$q$  — заряд конденсатора;

$S$  — площадь обкладки.

! Вне обкладок конденсатора напряженность электрического поля равна нулю.

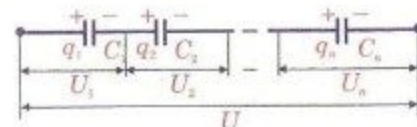
Сила притяжения между двумя разноименно заряженными обкладками плоского конденсатора:

$$F = q \frac{\sigma}{2\epsilon\epsilon_0} = \frac{q^2}{2\epsilon\epsilon_0 S} = \frac{\sigma^2 S}{2\epsilon\epsilon_0}.$$

### Соединение конденсаторов

Для получения требуемой емкости конденсаторы соединяют в батареи. Соединение конденсаторов может быть **параллельным**, **последовательным** и **смешанным**.

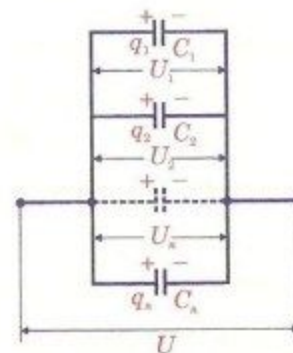
#### Последовательное соединение конденсаторов



При последовательном соединении конденсаторов выполняются следующие закономерности:

$$\begin{aligned} q &= q_1 = q_2 = q_3 = \dots = q_n, \\ U &= U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_n, \\ \frac{1}{C} &= \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n}. \end{aligned}$$

#### Параллельное соединение конденсаторов



При параллельном соединении конденсаторов выполняются следующие закономерности:

$$\begin{aligned} q &= q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n, \\ U &= U_1 = U_2 = U_3 = \dots = U_n, \\ C &= C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n. \end{aligned}$$



## ЭЛЕКТРОСТАТИКА

## Энергия заряженного конденсатора

Энергия заряженного конденсатора определяется работой, которую необходимо совершить, чтобы зарядить конденсатор.

Энергия заряженного конденсатора  $W$  — это энергия его электрического поля:

$$W = \frac{1}{2} q U = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C} = \frac{1}{2} C U^2.$$

Энергию конденсатора можно выразить через напряженность  $E$  электрического поля, сосредоточенного между его обкладками.

Для плоского конденсатора

$$C = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{S}{d}, \text{ а } U = E \cdot d.$$

Тогда

$$W = \frac{C U^2}{2} = \frac{1}{2} \varepsilon \varepsilon_0 \frac{S}{d} \cdot (E \cdot d)^2 = \frac{1}{2} \varepsilon \varepsilon_0 E^2 \cdot S \cdot d = \frac{1}{2} \varepsilon \varepsilon_0 E^2 \cdot V;$$

$$W = \frac{1}{2} \varepsilon \varepsilon_0 E^2 V = \frac{1}{2} \varepsilon \varepsilon_0 E^2 S d,$$

где  $V = Sd$  — внутренний объем конденсатора.

## Энергия заряженного уединенного проводника

Энергия заряженного уединенного проводника  $W$  равна

$$W = \frac{1}{2} q \varphi = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C} = \frac{1}{2} C \varphi^2,$$

где  $q$  — заряд проводника;

$\varphi$  — потенциал проводника;

$C$  — емкость проводника.

## Энергия и плотность энергии электрического поля

Для однородного электрического поля энергия  $W$  определяется соотношением

$$W_{эл} = \frac{1}{2} \varepsilon \varepsilon_0 E^2 V,$$

где  $\varepsilon$  — диэлектрическая проницаемость среды;

$\varepsilon_0$  — электрическая постоянная;

$E$  — напряженность электрического поля;

$V$  — объем, в котором находится электрическое поле.

Плотность энергии электрического поля  $w$  — это энергия электрического поля, приходящаяся на единицу объема:

$$w_{эл} = \frac{W_{эл}}{V} = \frac{1}{2} \varepsilon \varepsilon_0 E^2.$$

! Если среда изотропная, то выражение для плотности энергии  $w = \frac{1}{2} \varepsilon \varepsilon_0 E^2$  справедливо для электрических полей любых конфигураций.



## ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

### Электрический ток

**Электрический ток** — это упорядоченное движение свободных носителей электрических зарядов.

Вещества, проводящие электрический ток, называют проводниками.

К проводникам первого рода относятся металлы.

К проводникам второго рода относятся электролиты.

Свободными носителями электрических зарядов в металлах являются электроны, в электролитах — положительные и отрицательные ионы, в газах — электроны и ионы, в полупроводниках — электроны и дырки.

! Направленное движение свободных носителей зарядов во всех средах возникает под действием сил внешнего электрического поля.

За направление электрического тока условно приняли направление движения положительно заряженных частиц.

### Условия существования электрического тока

Для возникновения и существования электрического тока необходимо наличие:

- свободных носителей электрических зарядов;
- внешнего электрического поля, энергия которого должна каким-то образом восполняться.

### Сила тока

Сила тока  $I$  — это скалярная физическая величина, равная отношению электрического заряда, прошедшего через поперечное сечение проводника, ко времени его прохождения:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}.$$

! Единица силы тока в системе СИ  $[I] = 1 \text{ Кл/с} = 1 \text{ А (ампер)}$ .

Если сила и направление тока с течением времени не изменяются, то такой ток называют **постоянным**.

Если ток создается носителями обоих знаков, причем за время  $\Delta t$  через поперечное сечение проводника положительные носители переносят заряд  $\Delta q^+$  в одном направлении, а отрицательные — заряд  $\Delta q^-$  в противоположном, то сила тока

$$I = \frac{\Delta q^+}{\Delta t} + \frac{|\Delta q^-|}{\Delta t}.$$

Сила тока для металлического проводника (согласно классической электронной теории проводимости) равна

$$I = envS,$$

- где  $e$  — элементарный заряд (модуль заряда электрона);  
 $n$  — концентрация свободных электронов (число свободных электронов в единице объема проводника);  
 $v$  — средняя скорость упорядоченного движения электронов (скорость дрейфа);  
 $S$  — площадь поперечного сечения проводника.



## ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

## Плотность тока

**Плотность тока**  $\vec{j}$  — это векторная физическая величина, численно равная силе тока, проходящей через единицу площади поперечного сечения проводника, перпендикулярного направлению тока.

За **направление вектора плотности тока** принимается направление вектора скорости упорядоченного движения положительных носителей заряда.

Для постоянного тока, текущего перпендикулярно сечению проводника плотность тока равна

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

! Единица плотности тока в системе СИ  $[j] = 1 \text{ А/м}^2$ .

Плотность тока в проводнике определяется соотношением

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

или

$$\vec{j} = en\vec{v}$$

где  $e$  — элементарный заряд;

$n$  — концентрация свободных носителей заряда;

$\vec{v}$  — вектор скорости упорядоченного движения положительных носителей зарядов.

## Закон Ома для однородного участка цепи

**Однородным участком цепи** называется такой участок цепи, на котором не действуют сторонние силы.

**Сторонние силы** — это силы не электрического происхождения.

**Закон Ома для однородного участка цепи:** сила тока на однородном участке цепи прямо пропорциональна напряжению на его концах и обратно пропорциональна его сопротивлению:

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

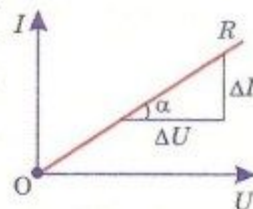
где  $R$  — сопротивление однородного участка цепи (сопротивление проводника).

! Единица сопротивления в системе СИ

$$[R] = 1 \text{ В/А} = 1 \text{ Ом.}$$

Согласно закону Ома график зависимости силы тока от напряжения (**вольтамперная характеристика**) для данного проводника представляет собой прямую линию. Тангенс угла наклона этой прямой к оси абсцисс обратно пропорционален сопротивлению проводника:

$$\frac{\Delta I}{\Delta U} = \frac{1}{R}$$



Величину  $U = I \cdot R$  часто называют **падением напряжения** на участке цепи.

! Для однородного участка цепи падение напряжения всегда совпадает с напряжением на нем.

! В металлах и электролитах зависимость силы тока от напряжения подчиняется закону Ома. Для газов и полупроводников этот закон в общем случае не выполняется.



# ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

## Сопротивление проводника

**Сопротивление проводника** — это скалярная физическая величина, характеризующая способность проводника препятствовать упорядоченному движению свободных носителей зарядов.

Сопротивление проводника зависит от его размеров и формы, а также от материала, из которого изготовлен проводник.

Сопротивление проводника длиной  $l$  с одинаковым поперечным сечением  $S$ , изготовленного из однородного материала, определяется соотношением

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

где  $\rho$  — удельное сопротивление материала.

! Единица удельного сопротивления в системе СИ  $[\rho] = 1 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ .

**Удельное сопротивление материала** зависит от температуры. Для большинства металлов в достаточно широком интервале температур справедлива линейная зависимость  $\rho$  от температуры  $t$ :

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

где  $\rho$  — удельное сопротивления проводника при  $t^\circ\text{C}$ ;  
 $\rho_0$  — удельное сопротивления проводника при  $0^\circ\text{C}$ ;  
 $\alpha$  — температурный коэффициент сопротивления.

! Единица температурного коэффициента сопротивления в системе СИ  $[\rho] = \text{град}^{-1} (\text{K}^{-1})$ .

Величина, обратная удельному сопротивлению  $\rho$ , называется удельной проводимостью  $\sigma$ :

$$\sigma = \frac{1}{\rho}.$$

! Единица удельной проводимости в системе СИ  $[\sigma] = 1 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ .

! Для электролитов температурный коэффициент сопротивления отрицателен, для металлов — положителен.



Если пренебречь изменением размеров проводника при нагревании, то

$$R = R_0(1 + \alpha t),$$

где  $R$  — сопротивления проводника при  $t^\circ\text{C}$ ;  
 $R_0$  — сопротивления проводника при  $0^\circ\text{C}$ .

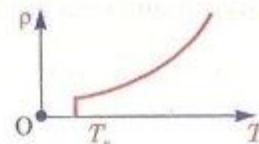
Величина, обратная сопротивлению  $R$ , называется проводимостью  $G$ :

$$G = \frac{1}{R}.$$

! Единица проводимости в системе СИ  $[G] = 1 \text{ Ом}^{-1} = 1 \text{ См}$  (сиemens).

При низких температурах наблюдается отступление от линейной зависимости  $\rho$  от  $t^\circ$ .

У большинства металлов и сплавов при температуре порядка нескольких кельвинов сопротивление скачком обращается в нуль. Это явление получило название **сверхпроводимости**.

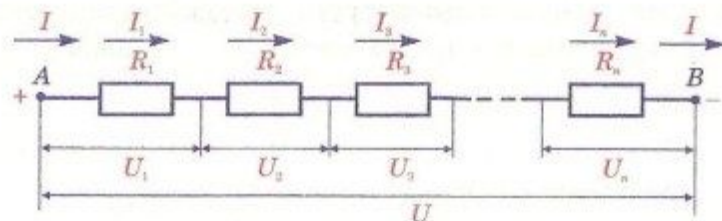




## ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

Последовательное и параллельное  
соединение проводников

## Последовательное соединение проводников



При последовательном соединении проводников справедливы следующие соотношения

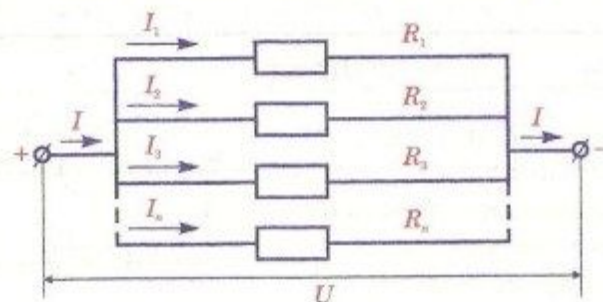
$$\begin{aligned} I &= I_1 = I_2 = I_3 = \dots = I_n; \\ U &= U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_n = \sum_{i=1}^n U_i; \\ R &= R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n = \sum_{i=1}^n R_i. \end{aligned}$$

Если  $R_1 = R_2 = R_3 = \dots = R_n$ , то общее сопротивление

$$R = n \cdot R_1.$$

! При последовательном соединении проводников их общее сопротивление будет больше наибольшего из сопротивлений.

## Параллельное соединение проводников



При параллельном соединении проводников справедливы следующие соотношения:

$$\begin{aligned} I &= I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n; \\ U &= U_1 = U_2 = U_3 = \dots = U_n; \\ \frac{1}{R} &= \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}. \end{aligned}$$

Для двух параллельно соединенных проводников их общее сопротивление равно

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

Если  $R_1 = R_2 = R_3 = \dots = R_n$ , то общее сопротивление

$$R = \frac{R_1}{n}.$$

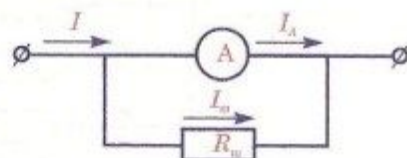
! При параллельном соединении проводников их общее сопротивление будет меньше наименьшего из сопротивлений.



## ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

### Шунт

Для измерения силы тока в цепи используют амперметры. Амперметр включается в измеряемую цепь последовательно. Каждый амперметр рассчитан на определенную максимальную силу тока. Для расширения предела измерения к амперметру параллельно подключают сопротивление, которое называют **шунтом**.



Используя закономерности параллельного соединения, можно получить

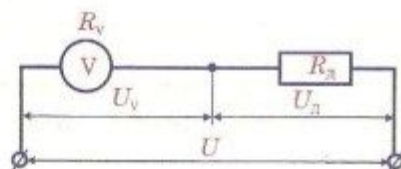
$$\left. \begin{aligned} I &= I_A + I_{\text{ш}} \\ I_A R_A &= I_{\text{ш}} R_{\text{ш}} \end{aligned} \right\} \Rightarrow I = I_A \left( 1 + \frac{R_A}{R_{\text{ш}}} \right).$$

Для измерения силы тока в  $n$  раз большей, чем та, на которую рассчитан амперметр ( $I = nI_A$ ), необходимо подключить шунт сопротивлением

$$R_{\text{ш}} = \frac{R_A}{n-1}.$$

### Добавочное сопротивление

Для измерения напряжения используют вольтметры. Вольтметр включается в измеряемую цепь параллельно. Каждый вольтметр рассчитан на определенное



максимальное напряжение. Для расширения предела измерения к вольтметру последовательно подключают сопротивление, которое называют **добавочным сопротивлением**.

Используя закономерности последовательного соединения, можно получить

$$\left. \begin{aligned} U &= U_V + U_{\text{д}} \\ \frac{U_V}{R_V} &= \frac{U_{\text{д}}}{R_{\text{д}}} \end{aligned} \right\} \Rightarrow U = U_V \left( 1 + \frac{R_{\text{д}}}{R_V} \right).$$

Для измерения напряжения в  $n$  раз большего, чем то, на которое рассчитан вольтметр ( $U = nU_V$ ), необходимо подключить добавочное сопротивление

$$R_{\text{д}} = R_V (n-1).$$

### Работа и мощность тока

При прохождении тока в цепи электрическое поле совершает работу по перемещению заряда. В этом случае работу электрического поля называют **работой тока**.

При прохождении заряда  $\Delta q = I\Delta t$  по участку цепи электрическое поле будет совершать работу

$$A = \Delta q(\varphi_1 - \varphi_2) = \Delta q U = UI\Delta t.$$

Для однородного участка цепи работу тока можно рассчитать следующим образом:

$$A = UI\Delta t = I^2 R \Delta t = \frac{U^2}{R} \Delta t.$$

Мощность тока в этом случае будет равна

$$P = \frac{A}{t} = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R}.$$



## ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

### Закон Джоуля-Ленца

**Закон Джоуля-Ленца:** количество теплоты  $Q$ , выделяемое в проводнике при прохождении электрического тока, прямо пропорционально произведению квадрата силы тока, сопротивления проводника и времени прохождения тока через проводник:

$$Q = I^2 R \Delta t$$

Если на участке цепи не совершается механическая работа и ток не производит химического действия, то вся работа электрического тока идет на нагревание проводника:

$$Q = A = I^2 R \Delta t = IU \Delta t = \frac{U^2}{R} \Delta t$$

### Электродвижущая сила (ЭДС)

**Сторонние силы** — это силы неэлектрического происхождения.

**Электродвижущая сила (ЭДС)** — это скалярная физическая величина, равная отношению работы сторонних сил при перемещении электрического положительного заряда  $q$  по замкнутой цепи, к величине этого заряда:

$$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{ст}}}{q}$$

! Электродвижущая сила является энергетической характеристикой источника.

! Единица ЭДС в системе СИ  $[\mathcal{E}] = 1 \text{ В}$ .

### Закон Ома для неоднородного участка цепи

Если участок электрической цепи содержит последовательно соединенные резисторы и источники тока, то такой участок цепи называется **неоднородным**.

Для такого участка выполняется закон Ома для неоднородного участка цепи:

$$\pm I = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2) \pm \mathcal{E}}{R + r}$$

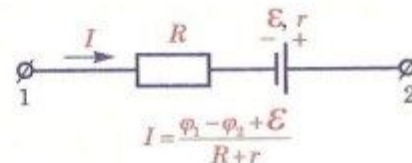
где  $\varphi_1 - \varphi_2$  — разность потенциалов на концах участка цепи;

$\mathcal{E}$  — электродвижущая сила источника тока с внутренним сопротивлением  $r$ ;

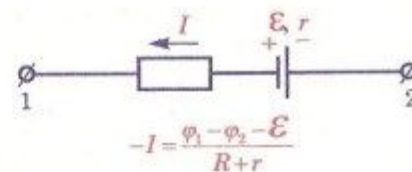
$R$  — сопротивление участка цепи.

**Правило знаков:** направление обхода участка цепи всегда выбирается от точки 1 к точке 2.

Сила тока  $I$  считается **положительной**, если направление тока совпадает с направлением обхода участка цепи, и **отрицательной** — в противоположном случае.



ЭДС считается **положительной**, если оно стремится создать на участ-



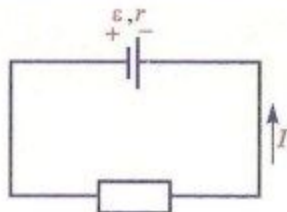
ке цепи ток, который по направлению совпадает с направлением обхода (т.е. если при обходе участка цепи мы идем от «-» к «+» внутри источника ЭДС), и **отрицательным** — в противоположном случае (если при обходе участка цепи мы идем от «+» к «-» внутри источника ЭДС).



## ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

### Закон Ома для полной цепи

**Закон Ома для полной цепи:** сила тока в замкнутой цепи прямо пропорциональна электродвижущей силе источника тока и обратно пропорциональна сумме сопротивлений ее внешнего и внутреннего участков:



$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r},$$

где  $R$  — сопротивление внешнего участка цепи;  
 $r$  — сопротивление внутреннего участка цепи.

Под **сопротивлением внутреннего участка цепи** понимают сопротивление источника тока.

Закон Ома для замкнутой цепи можно записать в виде

$$\mathcal{E} = U + Ir,$$

где  $U = IR$  — напряжение на внешнем участке цепи.

Если сопротивление внешнего участка цепи стремится к нулю ( $R \rightarrow 0$ ), то сила тока в данной цепи будет максимальной. Такой ток называют **током короткого замыкания**:

$$I_{\text{к.з.}} = \frac{\mathcal{E}}{r}.$$

! Ток короткого замыкания зависит только от ЭДС и сопротивления источника тока.

**Коэффициент полезного действия источника тока** — это отношение мощности, выделяемой на внешнем участке цепи (полезной мощности) к мощности, развиваемой источником тока (полной мощности):

$$\eta = \frac{P}{P_{\text{полн}}} = \frac{IU}{I\mathcal{E}} = \frac{U}{\mathcal{E}} = \frac{R}{R + r}.$$

**Полезная мощность:** мощность, выделяемая на внешнем участке цепи:

$$P = IU = I^2 R.$$

**Полная мощность:** мощность источника тока:

$$P_{\text{полн}} = I\mathcal{E} = I^2(R + r).$$

**Теряемая мощность:** мощность, выделяемая на внутреннем участке цепи:

$$P_{\text{тер}} = I^2 r.$$

**Наибольшая полезная мощность** выделяется в замкнутой цепи, если сопротивления ее внешнего и внутреннего участков равны ( $R = r$ ):

$$P_{\text{мах}} = I^2 R = \left( \frac{\mathcal{E}}{R + r} \right)^2 R = \frac{\mathcal{E}^2}{4r}.$$

Коэффициент полезного действия источника тока при этом  $\eta = 50\%$ .



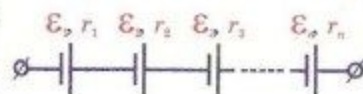
## ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

Последовательное соединение  
источников тока

При последовательном соединении  $n$  источников тока в одном направлении справедливы следующие соотношения:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 + \dots + \mathcal{E}_n = \sum_{i=1}^n \mathcal{E}_i;$$

$$r = r_1 + r_2 + r_3 + \dots + r_n = \sum_{i=1}^n r_i.$$



Если источники тока одинаковые, то:

$$\mathcal{E} = n\mathcal{E}_1;$$

$$r = nr_1.$$

Закон Ома для замкнутой цепи в этом случае будет иметь вид

$$I = \frac{n\mathcal{E}_1}{R + nr_1}.$$

## Параллельное соединение источников тока

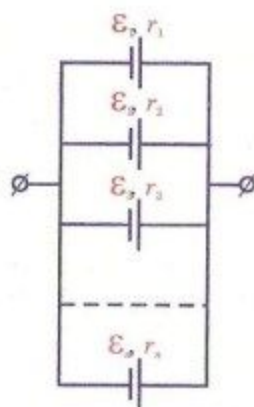
При параллельном соединении  $n$  одинаковых источников тока справедливы следующие соотношения:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_2 = \mathcal{E}_3 = \dots = \mathcal{E}_n;$$

$$r = \frac{r_1}{n}.$$

Закон Ома для замкнутой цепи в этом случае будет иметь вид

$$I = \frac{\mathcal{E}_1}{R + \frac{r_1}{n}}.$$



## Правила Кирхгофа

Для расчета разветвленных электрических цепей используют правила Кирхгофа.

Первое правило Кирхгофа записывается для узлов разветвленной цепи и основывается на законе сохранения заряда.

Узлом называют такую точку разветвленной цепи, в которой сходятся три и более проводников.

Первое правило Кирхгофа: алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю:

$$I_1 + I_2 + I_3 + \dots = I_n = 0.$$

Правило знаков: токи, текущие по направлению к узлу, считаются положительными, а токи, текущие по направлению от узла, считаются отрицательными.

Второе правило Кирхгофа записывается для любых замкнутых контуров разветвленной цепи и основывается на законах Ома для однородного и неоднородного участков цепи.

Второе правило Кирхгофа: алгебраическая сумма падений напряжений на всех участках замкнутого контура разветвленной цепи равна алгебраической сумме ЭДС, содержащихся в этом контуре:

$$I_1 R_1 + I_2 R_2 + I_3 R_3 + \dots + I_n R_n = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 + \dots + \mathcal{E}_n.$$

Правило знаков: падение напряжения считается положительным, если направление соответствующего тока совпадает с направлением обхода контура (выбранного заранее), и отрицательным — в противоположном случае. ЭДС считается положительной, если оно стремится создать во внешнем участке контура ток, который по направлению совпадает с направлением обхода контура (т.е. если при обходе контура мы идем от «-» к «+» внутри источника ЭДС), и отрицательным — в противоположном случае (если при обходе контура мы идем от «+» к «-» внутри источника ЭДС).



## ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

## Электрический ток в электролитах

Электролиты называют проводниками второго рода.

К электролитам относятся растворы солей, кислот и щелочей. При растворении веществ происходит электролитическая диссоциация.

Электролитическая диссоциация — это процесс распада веществ на отдельные ионы.

Если сосуд с электролитом с помощью электродов включить в электрическую цепь, то ионы электролита придут в движение и в цепи потечет электрический ток. При протекании тока в цепи на электродах происходит **выделение веществ**. Этот процесс называется **электролизом**.

Массу выделившегося вещества можно определить, используя законы Фарадея.

**Первый закон Фарадея:** масса вещества, выделившегося на электроде, пропорциональна заряду  $\Delta q$ , прошедшему через электролит:

$$m = k \Delta q = k I \Delta t,$$

где  $m$  — масса вещества, выделившегося на электроде;

$k$  — **электрохимический эквивалент** вещества;

$\Delta q$  — заряд, прошедший через электролит;

$I$  — сила тока, текущего через электролит;

$\Delta t$  — время протекания тока.

! Единица электрохимического эквивалента вещества в системе СИ  $[k] = 1 \text{ кг/Кл}$ .

**Химическим эквивалентом вещества** называют отношение молярной массы вещества к валентности ионов:

$$\frac{M}{n},$$

где  $M$  — молярная масса вещества;

$n$  — валентность ионов.

**Второй закон Фарадея:** электрохимический эквивалент вещества  $k$  пропорционален его химическому эквиваленту:

$$k = \frac{1}{F} \frac{M}{n},$$

где  $F = e N_A \approx 96\,500 \text{ Кл/моль}$  — **число Фарадея**.

**Объединенный закон Фарадея:**

$$m = \frac{1}{F} \frac{M}{n} \Delta q = \frac{1}{F} \frac{M}{n} I \Delta t.$$

! Электролиз применяется для получения металлов (алюминия, бериллия, кальция, натрия и др.), очистки и рафинирования, электролитического нанесения покрытий (золочения, серебрения, никелирования), формирования изображений (гальванопластика) и др.

! При протекании электрического тока в электролитах выполняются законы Ома и Джоуля-Ленца.



## МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

**Магнитное поле** — это особый вид материи, порождаемый движущимися электрическими зарядами, электрическими токами и намагниченными телами. Магнитное поле обнаруживается по действию на движущиеся электрические заряды, электрические токи и намагниченные тела.

### Вектор магнитной индукции

Для характеристики магнитного поля вводится векторная физическая величина  $\vec{B}$ , которая называется **магнитной индукцией** (вектором магнитной индукции). Магнитная индукция является силовой характеристикой магнитного поля.

Модуль вектора магнитной индукции равен отношению максимальной силы  $F_{\max}$ , действующей со стороны магнитного поля на проводник с током, к произведению силы тока  $I$  на длину проводника  $\Delta l$ :

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

Модуль вектора магнитной индукции также равен отношению максимального вращающего механического момента  $M_{\max}$ , действующего со стороны магнитного поля на контур с током, к произведению силы тока  $I$  на площадь контура  $S$ :

$$B = \frac{M_{\max}}{IS}$$

! Единица магнитной индукции в системе СИ  $[B] = 1 \text{ Тл}$  (тесла).

! Величина  $p_m = IS$  называется **магнитным моментом** контура с током.

В общем случае механический вращающий момент, действующий на контур с током, равен

$$M = p_m B \sin \alpha,$$

где  $\alpha$  — угол между вектором магнитной индукции  $\vec{B}$  и нормалью к контуру.

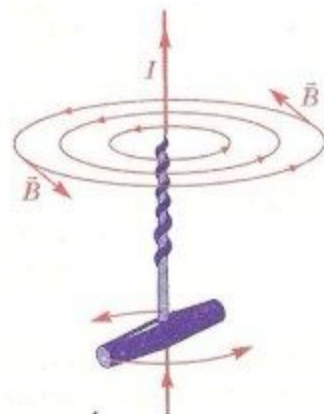
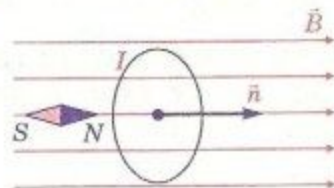
**Направление вектора магнитной индукции** совпадает с направлением северного полюса свободной магнитной стрелки, помещенной в данную точку поля. В некоторых случаях направление вектора  $\vec{B}$  можно определить с помощью **правила буравчика** (правого винта):

— **направление вектора индукции магнитного поля прямого тока.**

Если движение острия буравчика совпадает с направлением тока в проводнике, то направление вращения рукоятки буравчика совпадает с направлением вектора магнитной индукции;

— **направление вектора индукции магнитной индукции в центре кругового тока.**

Если вращение рукоятки буравчика совпадает с направлением тока в проводнике, то направление движения острия буравчика совпадает с направлением вектора магнитной индукции.



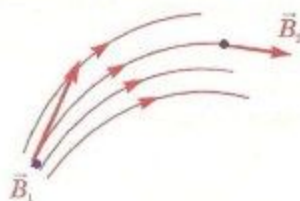


## МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

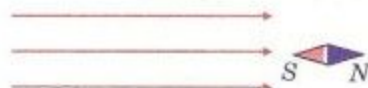
### Линии магнитной индукции

Магнитное поле графически изображают с помощью линий магнитной индукции.

**Линии магнитной индукции** — это направленные линии, касательные к которым в каждой точке поля совпадают с направлением вектора  $\vec{B}$ .



За направление линий магнитной индукции принято считать направление от южного к северному полюсу магнитной стрелки.



Линии магнитной индукции **всегда замкнуты**. Поэтому магнитное поле называют **вихревым**.

! Замкнутость линий магнитной индукции означает, что магнитное поле не имеет источников, т.е. в природе нет магнитных зарядов, подобных электрическим.

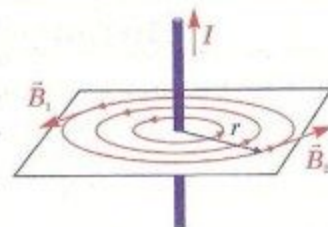
Через каждую точку поля проходит только одна линия магнитной индукции, поэтому **линии магнитной индукции не пересекаются**.

Чем гуще линии магнитной индукции, тем **больше модуль индукции магнитного поля**.

### Магнитное поле бесконечно длинного прямого проводника с током

Индукция магнитного поля, создаваемого бесконечно длинным прямым проводником с током  $I$ , в данной точке определяется соотношением

$$B = \frac{\mu_0 \mu I}{2\pi r}$$



где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Тл} \cdot \text{м}}{\text{А}} = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$  — магнитная постоянная;

$\mu$  — магнитная проницаемость среды;

$r$  — расстояние от проводника до рассматриваемой точки.

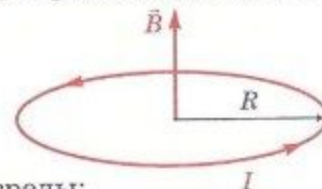
! Для проводника конечных размеров указанная выше формула будет справедлива только для точек, расстояние от которых до проводника значительно меньше, чем расстояния от них до его концов.

**Магнитная проницаемость среды  $\mu$**  — это физическая величина, показывающая, во сколько раз индукция магнитного поля в веществе больше, чем в вакууме. Если магнитное поле создается **в воздушной среде (вакууме)**, то берут  $\mu = 1$ .

### Магнитное поле кругового тока

Индукция магнитного поля в центре тонкого кругового витка, по которому течет ток силой  $I$ , определяется соотношением

$$B = \frac{\mu_0 \mu I}{2R}$$



где  $R$  — радиус кругового витка;

$\mu$  — магнитная проницаемость среды;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Тл} \cdot \text{м}}{\text{А}} = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$  — магнитная постоянная.



## МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

### Магнитное поле соленоида

**Соленоид** — это катушка, у которой витки намотаны в одну сторону. Если длина соленоида гораздо больше радиуса его витков, то поле внутри соленоида можно считать **однородным**.

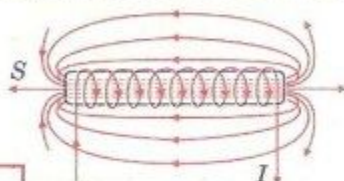
Индукция магнитного поля внутри соленоида, по которому течет ток силой  $I$ , определяется соотношением

$$B = \frac{\mu_0 \mu N I}{l} = \mu_0 n I,$$

где  $N$  — число витков в соленоиде;

$l$  — длина соленоида;

$n = \frac{N}{l}$  — число витков на единицу длины соленоида.



### Магнитное поле тороида

**Тороид** — это замкнутый в кольцо соленоид. Магнитное поле тороида сосредоточено внутри тороида. Вне его поле отсутствует.

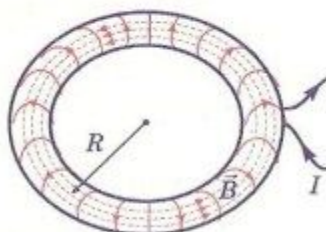
Индукция магнитного поля внутри тороида, по которому течет ток силой  $I$ , определяется соотношением

$$B = \frac{\mu_0 \mu N I}{2\pi R} = \mu_0 n I,$$

где  $N$  — число витков в тороиде;

$R$  — радиус осевой линии тороида;

$n = \frac{N}{2\pi R}$  — число витков на единицу длины тороида.



### Принцип суперпозиции магнитных полей

**Принцип суперпозиции:** если магнитное поле создается несколькими проводниками с током, то его индукция  $\vec{B}$  в данной точке равна векторной сумме магнитных индукций полей, создаваемых в этой точке каждым проводником с током в отдельности:

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \vec{B}_3 + \dots + \vec{B}_n = \sum_{i=1}^n \vec{B}_i.$$

### Сила Ампера

Сила, действующая со стороны магнитного поля на проводник с током, называется **силой Ампера**. Модуль силы Ампера вычисляется по формуле

$$F_A = I B \Delta l \cdot \sin \alpha,$$

где  $I$  — сила тока, текущего в проводнике;

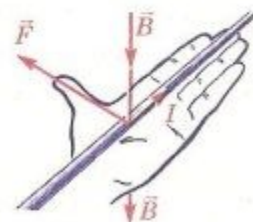
$B$  — индукция магнитного поля;

$\Delta l$  — длина проводника;

$\alpha$  — угол между направлением тока в проводнике и вектором  $\vec{B}$ .

Направление силы Ампера  $\vec{F}_A$  определяется **правилом левой руки**.

**Правило левой руки:** если левую руку расположить так, чтобы перпендикулярная к проводнику составляющая вектора индукции  $\vec{B}$  входила в ладонь, а четыре вытянутых пальца были направлены по направлению тока, то отогнутый на  $90^\circ$  большой палец покажет направление силы, действующей на участок проводника.





## МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

## Сила Лоренца

Сила, действующая со стороны магнитного поля на движущийся в нем заряд, называется **силой Лоренца**. Модуль силы Лоренца вычисляется по формуле

$$F_L = qvB \cdot \sin \alpha,$$

где  $q$  — модуль заряда;

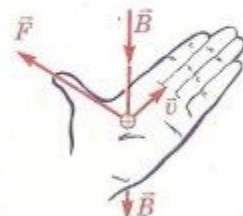
$v$  — скорость заряда;

$B$  — магнитная индукция;

$\alpha$  — угол между векторами  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$ .

Направление силы Лоренца  $\vec{F}_L$ , действующей на движущийся **положительный** заряд, определяется правилом левой руки.

**Правило левой руки:** если левую руку расположить так, чтобы перпендикулярная к скорости частицы составляющая вектора индукции  $\vec{B}$  вошла в ладонь, а четыре вытянутых пальца указывали направление движения заряда, то отогнутый на  $90^\circ$  большой палец покажет направление силы, действующей на этот заряд.



Если заряд **отрицательный**, то для определения направления силы Лоренца можно пользоваться тем же правилом, но в этом случае вектор силы Лоренца будет направлен противоположно отогнутому на  $90^\circ$  большому пальцу левой руки.

! Сила Лоренца всегда перпендикулярна к векторам  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$ .

! Сила Лоренца сообщает движущемуся заряду только центростремительное ускорение. Она не изменяет величину скорости заряда и не совершает работу.

Движение заряженных частиц  
в магнитном поле

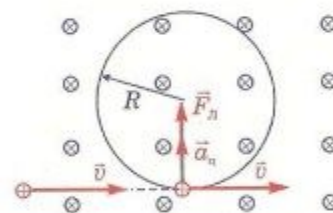
Возможны три случая движения заряженных частиц в магнитном поле.

1. Вектор  $\vec{v}$  частицы параллелен вектору магнитной индукции  $\vec{B}$ .

В этом случае заряженная частица движется в магнитном поле вдоль линий магнитной индукции. Угол  $\alpha$  между векторами  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$  равен **нулю** или  $180^\circ$ . Так как в этом случае  $\sin \alpha = 0$ , то сила Лоренца тоже равна **нулю**. Магнитное поле на частицу не действует, и она движется равномерно и прямолинейно.

2. Вектор  $\vec{v}$  частицы перпендикулярен к вектору магнитной индукции  $\vec{B}$ .

В этом случае заряженная частица движется в магнитном поле перпендикулярно к линиям магнитной индукции.



Угол  $\alpha = 90^\circ$ , а  $\sin \alpha = 1$ . Сила Лоренца  $F_L = qvB$  постоянна по модулю и перпендикулярна к траектории частицы. Частица в этом случае будет двигаться **по окружности** (или дуге окружности) в плоскости, перпендикулярной вектору магнитной индукции. Согласно второму закону Ньютона



## МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

### Движение заряженных частиц в магнитном поле (продолжение)

$$F_{\perp} = ma_{\perp} \Rightarrow qBv = \frac{mv^2}{R} \Rightarrow R = \frac{mv}{qB},$$

где  $R$  — радиус окружности, по которой движется частица.

Период вращения частицы

$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi m}{qB}.$$

Частота вращения частицы

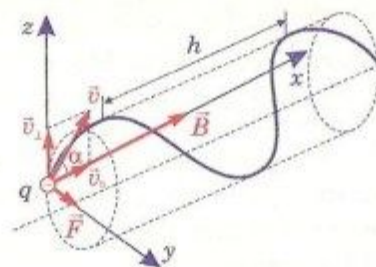
$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{qB}{2\pi m}.$$

Угловая скорость

$$\omega = 2\pi\nu = \frac{qB}{m}.$$

3. Вектор  $\vec{v}$  частицы направлен под некоторым углом  $\alpha$  к вектору магнитной индукции  $\vec{B}$ .

Заряженная частица движется под углом  $\alpha$  к линиям магнитной индукции. Движение частицы можно представить в виде суммы двух движений: а) равномерного прямолинейного движения вдоль поля со скоростью  $v_{\parallel} = v \cdot \cos\alpha$ ; б) равномерного движения по окружности со скоростью  $v_{\perp} = v \cdot \sin\alpha$ .



Суммарное движение будет движением по спирали (винтовой линии), ось которой параллельна вектору магнитной индукции.

Радиус винтовой линии

$$R = \frac{mv_{\perp}}{qB} = \frac{mv \sin\alpha}{qB}.$$

Период вращения

$$T = \frac{2\pi R}{v_{\perp}} = \frac{2\pi m}{qB}.$$

Шаг винтовой линии (расстояние, которое проходит частица вдоль оси винтовой линии за время, равное периоду вращения)

$$h = v_{\parallel} T = v \cos\alpha T = \frac{2\pi m v \cos\alpha}{qB} = 2\pi R \operatorname{ctg}\alpha.$$

! Если заряженная частица одновременно движется в магнитном и электрическом полях, то на нее кроме силы  $\vec{F}_{\perp}$  действует еще электрическая сила  $\vec{F}_{\text{эл}} = q\vec{E}$ .



## ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

### Магнитный поток

Магнитным потоком (потоком магнитной индукции)

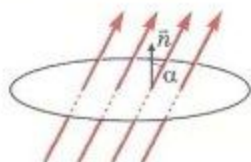
$\Phi$  через площадь поверхности, охватываемой некоторым плоским контуром, находящимся в однородном магнитном поле, называется величина

$$\Phi = BS \cdot \cos\varphi,$$

где  $B$  — индукция магнитного поля;

$S$  — площадь контура;

$\varphi$  — угол между вектором  $\vec{B}$  и нормалью  $\vec{n}$  к поверхности контура.



! Единица магнитного потока в системе СИ  $[\Phi] = 1 \text{ Вб}$  (вебер).

Магнитный поток зависит от величины магнитной индукции  $B$ , площади контура  $S$  и ориентации контура по отношению к вектору магнитной индукции.

Если контур содержит  $N$  витков, то говорят о **полном магнитном потоке**, сцепленном со всеми витками контура, или **потокосцеплении**  $\Phi_{\text{пол}}$ :

$$\Phi_{\text{пол}} = N\Phi = NBS \cdot \cos\varphi,$$

где  $\Phi$  — магнитный поток, пронизывающий один виток.

! Так как линии магнитной индукции всегда замкнуты, то магнитный поток через любую замкнутую поверхность всегда равен нулю.

### Электромагнитная индукция

Электромагнитная индукция — это явление возникновения в контуре **электродвижущей силы** (ЭДС) при изменении магнитного потока, пронизывающего этот контур.

Возникающую при этом электродвижущую силу назвали **электродвижущей силой индукции**  $\mathcal{E}_i$ .

Если контур замкнут, то в нем течет электрический ток, названный **индукционным**.

! Изменяющийся магнитный поток можно получить, используя переменное магнитное поле (изменяя  $B$ ), изменяя геометрию контура (изменяя  $S$ ) или положение контура в пространстве (изменяя  $\varphi$ ).

Возможно и изменение всех указанных величин.

$$\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1 = B_2 S_2 \cdot \cos\varphi_2 - B_1 S_1 \cdot \cos\varphi_1.$$

! Величина ЭДС индукции  $\mathcal{E}_i$  не зависит от способа, которым осуществляется изменение потока.



# ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

## Закон Фарадея–Ленца

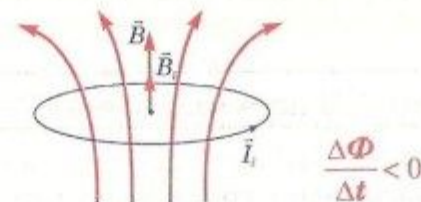
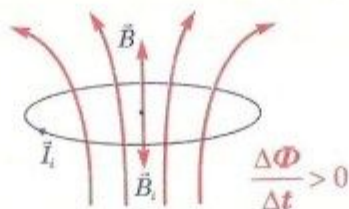
**Закон Фарадея–Ленца:** электродвижущая сила индукции, возникающая в контуре, численно равна и противоположна по знаку скорости изменения магнитного потока, пронизывающего этот контур:

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

где  $\Delta \Phi = \Phi_2 - \Phi_1$  — изменение магнитного потока;  
 $\Delta t = t_2 - t_1$  — время изменения магнитного потока;  
 $\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$  — скорость изменения магнитного потока.

Знак «–» в уравнении отражает **правило Ленца**.

Согласно **правилу Ленца** индукционный ток в контуре имеет такое направление, что его собственное магнитное поле препятствует изменению внешнего магнитного потока. Направление индукционного тока определяется с помощью правила буравчика, учитывая, что при возрастании магнитного потока  $\Phi$  вектор индукции магнитного поля индукционного тока  $\vec{B}_i$  направлен противоположно вектору индукции внешнего магнитного поля  $\vec{B}$ , а при убывании  $\Phi$  вектор индукции магнитного поля индукционного тока  $\vec{B}_i$  сонаправлен с вектором индукции внешнего магнитного поля  $\vec{B}$ .



Если контур, в котором индуцируется ЭДС, состоит из  $N$  витков, то ЭДС индукции определяется формулой

$$\mathcal{E}_i = - \frac{\Delta \Phi_{\text{пол}}}{\Delta t} = - N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}.$$

Величину  $\Phi_{\text{пол}} = N\Phi = NBS \cdot \cos \varphi$  (где  $\Phi$  — магнитный поток, пронизывающий один виток) называют **полным магнитным потоком**, сцепленным со всеми витками, или **потокосцеплением**.

Если контур, в котором индуцируется ЭДС, замкнуть, то в цепи будет течь индукционный ток, равный

$$I_i = \frac{\mathcal{E}_i}{R} = - \frac{\Delta \Phi_{\text{пол}}}{R \Delta t} = - \frac{N \Delta \Phi}{R \Delta t},$$

где  $R$  — сопротивление контура.

Величина заряда, переносимого индукционным током, равна

$$\Delta q = I_i \cdot \Delta t = - \frac{\Delta \Phi_{\text{пол}}}{R} = - \frac{N \Delta \Phi}{R}.$$

! Из последнего выражения видим, что  $\Delta q$  не зависит от времени изменения полного магнитного потока, а определяется только начальным  $\Phi_1$  и конечным  $\Phi_2$  его значениями.



## ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

### Механизмы возникновения ЭДС индукции

Хотя величина ЭДС индукции и не зависит от способа изменения магнитного потока, механизмы ее возникновения при этом оказываются **разными**.

Если магнитный поток меняется вследствие движения проводящего контура в постоянном магнитном поле, то разделение разноименных зарядов в проводнике происходит под действием составляющей силы Лоренца, направленной параллельно участкам контура (т.е. **сила Лоренца выполняет роль сторонней силы**). Под действие этой силы положительные заряды скапливаются на одном конце проводника, а отрицательные заряды — на другом. Это будет происходить до тех пор, пока сила Лоренца не уравнивается силами электростатического поля, создаваемого этими зарядами внутри проводника. Так возникает **разность потенциалов**, которая при разомкнутой цепи равна ЭДС индукции.

Если неподвижный контур находится в переменном магнитном поле, то механизм возникновения ЭДС индукции совсем другой. Изменяющееся во времени магнитное поле возбуждает **вихревое электрическое поле**. Под действием этого поля происходит перераспределение разноименных электрических зарядов, вследствие чего возникает ЭДС индукции.

! Индуцированное электрическое поле обладает рядом свойств:

- не является кулоновским полем. Оно создается не зарядами, распределенными в пространстве, а переменным магнитным полем;

— является вихревым и не потенциальным полем. Работа, совершаемая в этом поле при перемещении заряда по замкнутой цепи, не равна нулю и численно равна ЭДС индукции в замкнутом проводящем контуре.

### ЭДС индукции, возникающей в движущемся проводнике

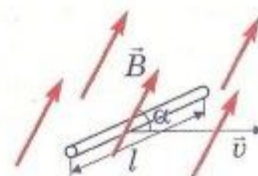
ЭДС индукции, возникающей в проводнике, который движется в постоянном магнитном поле, определяется выражением

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

где  $B$  — индукция магнитного поля;

$l$  — длина проводника;

$\alpha$  — угол между векторами скорости  $\vec{v}$  и индукции магнитного поля  $\vec{B}$ .



Если стержень вращается в перпендикулярном магнитном поле относительно оси, проходящей через один из его концов, то ЭДС индукции будет равна

$$\mathcal{E}_i = \frac{1}{2} Blv = \frac{1}{2} \omega B l^2 = \pi n B l^2,$$

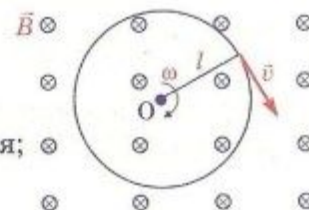
где  $B$  — индукция магнитного поля;

$l$  — длина проводника;

$v$  — линейная скорость конца проводника;

$\omega$  — угловая скорость вращения;

$n$  — частота вращения.





## ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

### ЭДС индукции, возникающая при вращении диска в магнитном поле

Рассмотрим случай возникновения ЭДС во вращающемся диске со скользящими контактами. Пусть диск расположен перпендикулярно к линиям индукции магнитного поля и может вращаться вокруг оси  $O$ , проходящей через его центр. С помощью скользящих контактов  $a$  и  $b$  образована замкнутая цепь  $AbaA$ . Если диск привести во вращение, то в этой цепи возникает индукционный ток.

Найдем ЭДС индукции.

При повороте диска на малый угол радиус поворачивается на угол  $\Delta\varphi$  и проходит площадь

$$\Delta S = \frac{1}{2} R^2 \Delta\varphi,$$

где  $R$  — радиус диска.

Изменение магнитного потока через эту площадь будет равно

$$\Delta\Phi = B\Delta S,$$

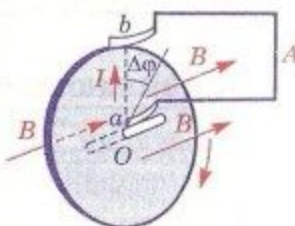
а скорость изменения магнитного потока будет равна

$$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = B \frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{1}{2} BR^2 \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \frac{1}{2} BR^2 \omega,$$

где  $\frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \omega$  — угловая скорость диска.

Подставляя это выражение в закон Фарадея-Ленца, найдем величину ЭДС индукции

$$|\varepsilon_i| = \frac{1}{2} BR^2 \omega.$$



### Принцип действия простейшего генератора переменного тока

Пусть рамка, содержащая  $N$  витков, равномерно вращается с угловой скоростью  $\omega$  в однородном магнитном поле, при этом ось катушки лежит в ее плоскости и расположена перпендикулярно к вектору  $\vec{B}$ . Магнитный поток  $\Phi_{\text{пол}}$ , сцепленный с витками катушки, равен

$$\Phi_{\text{пол}} = NBS \cdot \cos\varphi.$$

В данных условиях  $\Phi_{\text{пол}}$  изменяется из-за того, что угол  $\varphi$  между нормалью  $\vec{n}$  рамки и вектором  $\vec{B}$  в процессе вращении рамки изменяется во времени по закону

$$\varphi = \omega t.$$

Поэтому  $\Phi_{\text{пол}} = NBS \cdot \cos\omega t$ .

Чтобы найти ЭДС индукции  $\varepsilon_i$ , надо взять производную по  $t$  от выражения для полного магнитного потока  $\Phi_{\text{пол}}$ :

$$\varepsilon_i = -\Phi' = (-NBS \cdot \cos\omega t)' = NBS\omega \cdot \sin\omega t = \varepsilon_m \cdot \sin\omega t,$$

где  $\varepsilon_i$  — мгновенное значение ЭДС;

$N$  — число витков в рамке;

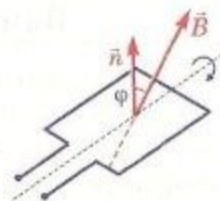
$B$  — индукция магнитного поля;

$S$  — площадь рамки;

$\varepsilon_m = NBS\omega$  — амплитудное (максимальное) значения ЭДС.

В этом случае в рамке индуцируется ЭДС, значение которой меняются по закону синуса. Таков принцип действия простейшего генератора переменного тока.

! Заметим, что при вращении катушки вокруг оси, лежащей в ее плоскости и направленной вдоль вектора  $\vec{B}$ , ЭДС не возникает, так как угол между векторами нормали  $\vec{n}$  и индукции  $\vec{B}$  равен нулю, поэтому поток  $\Phi_{\text{пол}} = 0$ .





## ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

### Явление самоиндукции

**Явлением самоиндукции** называется возникновение ЭДС индукции в проводящем контуре в результате изменения в нем силы тока. Появляющуюся при этом электродвижущую силу называют **ЭДС самоиндукции**.

! Явление самоиндукции является частным случаем электромагнитной индукции.

Электрический ток, проходящий по проводнику, создает вокруг него собственное магнитное поле. **Собственный магнитный поток**  $\Phi_s$ , пронизывающий контур, пропорционален силе тока в контуре:  $I$ :

$$\Phi_s = L \cdot I,$$

где  $L$  — индуктивность контура (или коэффициент самоиндукции).

ЭДС самоиндукции, возникающей в контуре при изменении его собственного магнитного потока, по закону электромагнитной индукции равна

$$\mathcal{E}_{si} = - \frac{\Delta \Phi_s}{\Delta t} = - \frac{\Delta(LI)}{\Delta t} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t},$$

где  $\Delta I = (I_2 - I_1)$  — изменение силы тока в контуре;

$\Delta t = (t_2 - t_1)$  — время его изменения;

$L$  — индуктивность контура;

$\frac{\Delta I}{\Delta t}$  — скорость изменения силы тока.

! Данное выражение справедливо, если индуктивность контура постоянная ( $L = \text{const}$ ). Это условие выполняется, если у контура не изменяются форма и размеры и среда не ферромагнитная ( $\mu = \text{const}$ ).

### Индуктивность

**Индуктивность  $L$**  — это физическая величина, численно равная собственному магнитному потоку, пронизывающему контур, при силе тока в контуре  $1 \text{ A}$ :

$$L = \frac{\Phi_s}{I}.$$

! Единица индуктивности в системе СИ  $[L] = 1 \text{ Гн (генри)}$ . Индуктивности  $L$  зависит от размеров и формы проводника, а также от магнитных свойств среды, в которой он находится.

Второе определение индуктивности контура:

**Индуктивность  $L$**  — это скалярная физическая величина, численно равная ЭДС самоиндукции, возникающей в контуре при изменении силы тока на  $1 \text{ A}$  за  $1 \text{ с}$ :

$$L = \frac{\mathcal{E}_{si} \Delta t}{\Delta I}.$$

### Индуктивность соленооида

Индуктивность соленооида определяется выражением

$$L = \mu \mu_0 \frac{N^2}{l} S = \mu \mu_0 n^2 S l = \mu \mu_0 n^2 V,$$

где  $\mu$  — магнитная проницаемость сердечника;

$\mu_0$  — магнитная постоянная;

$N$  — число витков в соленоиде;

$l$  — длина соленооида;

$S$  — площадь поперечного сечения соленооида;

$n = \frac{N}{l}$  — число витков на единицу длины;

$V = S l$  — объем соленооида.



## ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

### Энергия и плотность энергии магнитного поля

Энергия магнитного поля  $W_m$ , создаваемого током силой  $I$ , проходящим по проводнику индуктивностью  $L$ , равна

$$W_m = \frac{1}{2} LI^2.$$

Энергию магнитного поля, заключенную в единице объема пространства, называют **объемной плотностью энергии магнитного поля**  $w_m$ :

$$w_m = \frac{W_m}{V}.$$

Объемную плотность энергии магнитного поля  $w_m$  можно выразить через индукцию магнитного поля  $B$ :

$$w_m = \frac{B^2}{2\mu\mu_0},$$

где  $B$  — индукция магнитного поля;

$\mu$  — магнитная проницаемость среды;

$\mu_0$  — магнитная постоянная.

Энергию магнитного поля  $W_m$  можно также выразить через индукцию магнитного поля:

$$W_m = w_m V = \frac{B^2}{2\mu\mu_0} V.$$

## МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ



## МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

**Колебания** — это движения, которые точно или приблизительно повторяются через определенный интервал времени. Различают **свободные** и **вынужденные** колебания.

В зависимости от физической природы колебательной системы различают механические и электромагнитные колебания.

**Свободными (собственными)** называются колебания, при которых тело, будучи выведенным из положения равновесия каким-нибудь внешним воздействием, в дальнейшем предоставлено самому себе. В этом случае колебания происходят только под действием **внутренних сил** системы.

! Свободные колебания происходят с частотой, которая зависит только от параметров системы. Ее называют **частотой собственных колебаний (собственной частотой)**.

**Вынужденными** называются колебаниями, которые совершаются под действием **внешней периодической силы**.

! Частота вынужденных колебаний равна частоте внешней вынуждающей силы.

Если в механической колебательной системе не действуют силы трения и сопротивления, то свободные колебания такой системы являются **незатухающими**.

В реальных колебательных системах всегда присутствуют силы трения и сопротивления. Энергия механических ко-

лебаний такой системы расходуется на работу против этих сил, поэтому свободные колебания такой системы являются **затухающими** (амплитуда их с течением времени уменьшается, пока не станет равной нулю).

Простейшим видом колебаний являются **гармонические колебания**. Это такие движения, когда физические величины изменяются по закону **синуса** (или **косинуса**).

Колебательную систему, совершающую такие колебания, называют **гармоническим осциллятором**.

### Характеристики гармонических колебаний

Гармонические колебания характеризуются **периодом**, **частотой**, **циклической частотой**, **амплитудой**, **фазой**, **начальной фазой колебаний**.

**Период колебаний  $T$**  — это наименьший промежуток времени, по истечении которого повторяются значения всех физических величин, характеризующих колебания.

! Единица периода колебаний в системе СИ  $[T] = 1 \text{ с}$ .

**Частота колебаний  $\nu$**  — число колебаний в единицу времени:

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

! Единица частоты колебаний в системе СИ  $[\nu] = 1 \text{ с}^{-1} = 1 \text{ Гц (герц)}$ .

**Циклическая (угловая) частота  $\omega$**  — число колебаний за  $2\pi$  секунд:

$$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}$$

! Единица циклической частоты колебаний в системе СИ  $[\omega] = 1 \text{ с}^{-1} = 1 \text{ Гц (герц)}$ .

**Амплитуда  $A$**  — максимальное смещение колеблющегося тела от положения равновесия.



## МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

## Уравнение гармонических колебаний

При гармонический колебаниях координата колеблющегося тела описывается следующим соотношением:

$$x = A \cos(\omega t + \varphi_0),$$

где  $x$  — смещение материальной точки из положения равновесия в момент времени  $t$ ;

$A$  — амплитуда колебаний;

$\omega$  — циклическая частота;

$\varphi_0$  — начальная фаза колебаний;

$\omega t + \varphi_0$  — фаза колебаний.

! Зависимость координаты от времени  $x = A \cos(\omega t + \varphi_0)$  называют кинематическим законом гармонического движения.

Фаза колебаний  $\varphi = (\omega t + \varphi_0)$  — величина, определяющая значение изменяющейся величины в данный момент времени  $t$  (аргумент периодической функции).

Начальная фаза колебаний  $\varphi_0$  — это фаза колебаний в начальный момент времени (в момент времени  $t = 0$ ).

Скорость гармонически колеблющейся точки будет определяться выражением

$$v_x = x' = A\omega \cdot \sin(\omega t + \varphi_0) = v_{\max} \cdot \sin(\omega t + \varphi_0),$$

где  $v_{\max} = A\omega$  — максимальное значение скорости колеблющейся точки.

Ускорение гармонически колеблющейся точки

$$a_x = v_x' = x'' = -A\omega^2 \cdot \cos(\omega t + \varphi_0) = -\omega^2 x,$$

где  $a_{\max} = A\omega^2$  — максимальное значение ускорения колеблющейся точки.

! Ускорение гармонически колеблющейся точки прямо пропорционально смещению и противоположно ему по направлению.

## Дифференциальное уравнение гармонических колебаний

Ускорение и смещение гармонически колеблющейся точки связаны соотношением

$$a_x = -\omega^2 x \Rightarrow a_x + \omega^2 x = 0.$$

Так как ускорение  $a_x$  является второй производной по времени от координаты  $x$  ( $a_x = x''$ ), то получаем дифференциальное уравнение гармонических колебаний

$$x'' + \omega^2 x = 0.$$

По второму закону Ньютона возвращающая сила будет равна

$$F_x = m a_x = -m A \omega^2 \cdot \cos(\omega t + \varphi_0) = -m \omega^2 x = -kx,$$

где  $k = m\omega^2$ .

! Гармонические колебания совершаются под действием возвращающей силы, пропорциональной смещению тела из положения равновесия ( $F_x = -kx$ ).

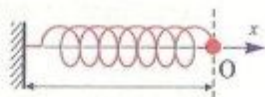
! Когда возвращающая сила равна нулю ( $F_x = 0$ ), то координата тела тоже равна нулю ( $x = 0$ ). Это соответствует положению равновесия колеблющегося тела.



## МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

## Пружинный маятник

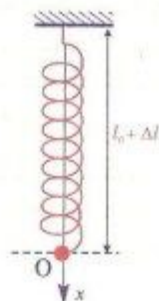
Простейшей колебательной системой является **пружинный маятник** — груз массой  $m$ , прикрепленный к невесомой пружине с коэффициентом жесткости  $k$ .



Колебания в этом случае происходят под действием силы упругости  $F_x = -kx$ .

Пружинный маятник бывает **горизонтальным** и **вертикальным**.

При **горизонтально** расположенном пружинном маятнике положение равновесия определяется длиной недеформированной пружины.



При **вертикально** расположенном пружинном маятнике положение равновесия определяется длиной деформированной пружины при отсутствии колебаний ( $k\Delta l = mg$ ).

**Период колебаний** пружинного маятника в обоих случаях определяется выражением

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

**Частота колебаний** пружинного маятника

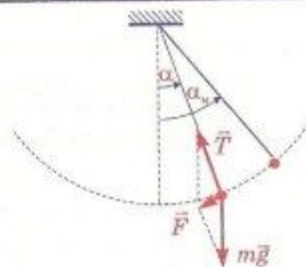
$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

**Циклическая частота колебаний** пружинного маятника

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

## Математический маятник

**Математический маятник** — это материальная точка, подвешенная на нерастяжимой невесомой нити длиной  $l$  в поле каких-либо сил. При малых углах отклонения ( $\alpha \leq 10^\circ$ ) такой маятник будет совершать гармонические колебания.



Если математический маятник совершает колебания в поле силы тяжести Земли, то **период его колебаний** определяется выражением

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

где  $l$  — длина маятника;

$g$  — ускорение свободного падения.

**Частота колебаний** математического маятника

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

**Циклическая частота колебаний** математического маятника

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu = \sqrt{\frac{g}{l}}$$

В общем случае, когда математический маятник находится в однородных полях нескольких сил ( $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \dots, \vec{F}_n$ ), то для определения периода (частоты, циклической частоты) вводят понятие **эффективного ускорения**  $\vec{g}^*$ , характеризующее действие этих полей. Эффективное ускорение  $\vec{g}^*$  можно найти, используя соотношение

$$m\vec{g}^* = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n$$



## МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

## Математический маятник (продолжение)

Тогда период колебаний математического маятника будет равен

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g^*}}$$

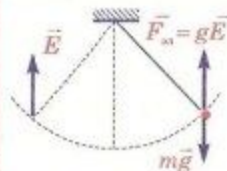
Например:

1. Математический маятник длиной  $l$  совершает колебания в однородном электростатическом поле напряженностью  $E$ . Грузу маятника массой  $m$  сообщен положительный заряд  $q$  ( $q > 0$ ).

В этом случае  $m\vec{g}^* = m\vec{g} + \vec{F}_{эл} = m\vec{g} + q\vec{E}$ ,

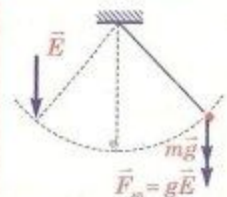
а эффективное ускорение будет равно  $\vec{g}^* = \vec{g} + \frac{q\vec{E}}{m}$ .

Напряженность  $E$  направлена вертикально вверх



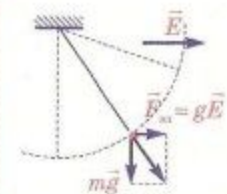
$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g - qE/m}}$$

Напряженность  $E$  направлена вертикально вниз



$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g + qE/m}}$$

Напряженность  $E$  направлена горизонтально



$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{\sqrt{g^2 + (qE/m)^2}}}$$

(положение равновесия в этом случае совпадает с направлением равнодействующей сил  $m\vec{g}$  и  $\vec{F}_{эл}$ )

2. Подвес математического маятника длиной  $l$  движется с ускорением  $a$ .

Так как подвес маятника движется с ускорением  $\vec{a}$ , то система отсчета, связанная с маятником, является неинерциальной.

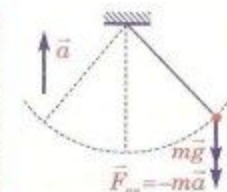
Чтобы можно было применять законы Ньютона, вводят силу инерции  $\vec{F}_{ин}$ , направленную в сторону, противоположную ускорению и по модулю равную  $ma$  ( $\vec{F}_{ин} = -m\vec{a}$ ).

Если ввести силу инерции, то систему отсчета, связанную с маятником, можно рассматривать как инерциальную.

В этом случае  $m\vec{g}^* = m\vec{g} + \vec{F}_{ин} = m\vec{g} - m\vec{a}$ ,

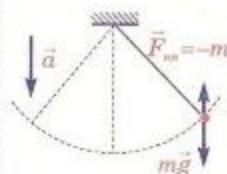
а эффективное ускорение будет равно  $\vec{g}^* = \vec{g} - \vec{a}$ .

Подвес движется с ускорением  $a$  вертикально вверх



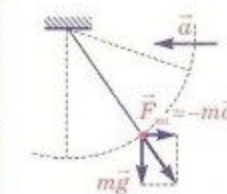
$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g + a}}$$

Подвес движется с ускорением  $a$  вертикально вниз



$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g - a}}$$

Подвес движется с ускорением  $a$  горизонтально



$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{\sqrt{g^2 + a^2}}}$$

(положение равновесия в этом случае совпадает с направлением равнодействующей сил  $m\vec{g}$  и  $\vec{F}_{ин}$ )



## МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

### Превращение энергии при колебательном движении

При гармонических колебаниях происходит непрерывное превращение кинетической энергии в потенциальную энергию, и наоборот.

В случае колебания груза на пружине максимальная потенциальная энергия будет в том случае, когда груз смещен от положения равновесия на величину, равную амплитуде колебания:

$$P_{\max} = \frac{kA^2}{2}.$$

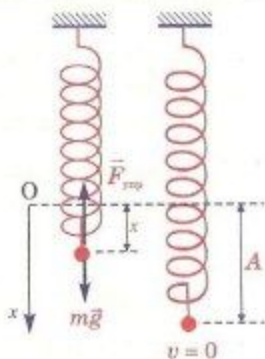
При этом кинетическая энергия будет равна нулю:  $K = 0$ . При перемещении в сторону положения равновесия потенциальная энергия переходит в кинетическую энергию:

$$K = \frac{mv^2}{2}, \quad P = \frac{kx^2}{2}.$$

В положении равновесия ( $x = 0$ ) потенциальная энергия системы будет равна нулю:  $P = 0$ , а кинетическая энергия будет максимальной:

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

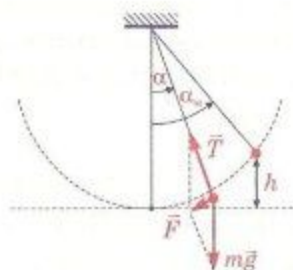
После прохождения положения равновесия кинетическая энергия снова переходит в потенциальную энергию пружины.



В отсутствие сил трения и сопротивления выполняется закон сохранения полной механической энергии:

$$E = \frac{kA^2}{2} = \frac{kx^2}{2} + \frac{mv^2}{2} = \frac{mv_{\max}^2}{2} = \text{const}.$$

Аналогичные превращения энергии имеют место при колебаниях математического маятника. Вся потенциальная энергия тела, равная  $mgh$ , полностью переходит в кинетическую  $\frac{mv^2}{2}$  к моменту прохождения маятником положения равновесия, которая далее снова переходит в потенциальную при отклонении маятника в противоположную сторону.



При гармонических колебаниях материальной точки полная механическая энергия определяется выражением

$$E = K + P = \frac{mv^2}{2} + \frac{kx^2}{2} = \frac{mA^2\omega^2\sin^2(\omega t + \varphi_0)}{2} + \frac{kA^2\cos^2(\omega t + \varphi_0)}{2}.$$

Если учесть, что коэффициент  $k = m\omega^2$ , то полная энергия гармонически колеблющейся материальной точки будет равна

$$E = \frac{m\omega^2 A^2}{2} = \frac{kA^2}{2}.$$

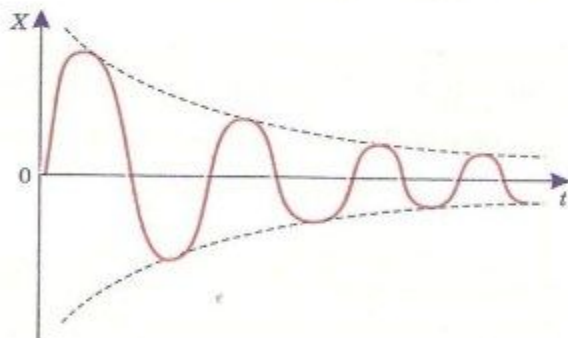


## МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

## Затухающие колебания

Свободные колебания с течением времени затухают, так как в реальных условиях всегда существуют силы трения и сопротивления. Часть полной механической энергии системы тратится на работу против этих сил, поэтому энергия системы будет с течением времени также уменьшаться.

Так как полная механическая энергия колеблющейся системы равна  $E = \frac{kA^2}{2}$ , то при уменьшении энергии системы с течением времени амплитуда колебаний будет также уменьшаться.



Колебания, амплитуда которых с течением времени уменьшается вследствие потерь энергии колебательной системы, называются затухающими.

! При малых потерях энергии колебания можно считать периодическими и использовать такие понятия как период и частота колебаний.

## Вынужденные колебания

Чтобы колебания оставались незатухающими, нужно энергию колеблющейся системы постоянно пополнять за счет действия внешней периодической силы:

$$F = F_m \cos \omega^* t$$

Колебания в этом случае совершаются с частотой  $\omega^*$  вынуждающей силы и называются вынужденными.

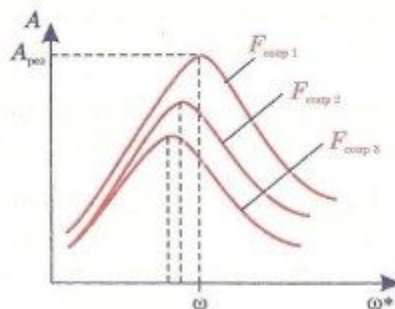
Уравнение вынужденных колебаний

$$x = A \cos(\omega^* t + \varphi_0)$$

Амплитуда  $A$  вынужденных колебаний зависит не только от амплитуды  $F_m$  вынуждающей силы, но и от соотношения частоты  $\omega^*$  вынуждающей силы и собственной частоты колебаний системы  $\omega$ . В случае, когда  $\omega^*$  близка к  $\omega$ , наступает явление резонанса.

**Явление резонанса** — это явление резкого возрастания амплитуды колебаний системы при совпадении частоты вынуждающей силы с собственной частотой колебаний системы.

Величина амплитуды в области резонанса сильно зависит от силы сопротивления, действующей в системе. Чем меньше сила сопротивления  $F_s$ , тем больше  $A_{\text{рез}}$  ( $F_{\text{сопр } 1} < F_{\text{сопр } 2} < F_{\text{сопр } 3}$ ).



! При совпадении частоты вынуждающей силы и собственной частоты колебаний системы внутренние и внешние силы действуют синхронно. Поэтому их действие усиливается, что приводит к росту амплитуды колебаний.



## МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ

Процесс распространения колебаний в сплошной среде, периодический во времени и пространстве, называется **волной**.

! При распространении волны отсутствует перенос вещества. Частицы колеблются около положения равновесия. Распространении волны сопровождается передачей энергии колеблющегося тела от одной точки среды к другой.

**Волновой фронт** — это воображаемая поверхность, до которой дошли колебания в данный момент времени.

**Волновая (фазовая) поверхность** — это поверхность, точки которой при колебаниях имеют одинаковую фазу.

Волны бывают **продольными** и **поперечными**.

Волна называется **продольной**, если частицы среды колеблются в направлении распространения волны.

! Продольные волны обусловлены деформациями растяжения и сжатия и могут распространяться в твердых телах, жидкостях и газах.

Волна называется **поперечной**, если частицы среды колеблются в направлении, перпендикулярном к распространению волны.

! Поперечные волны обусловлены деформациями сдвига и могут распространяться только в твердых телах.

## Уравнение волны

Пусть волна распространяется в направлении оси  $y$ , тогда **уравнение волны** будет иметь вид:

$$x = A \sin \left[ \omega \left( t - \frac{y}{v} \right) \right] = A \sin [\omega t - ky],$$

где  $x$  — смещение от положения равновесия точки волны;

$A$  — амплитуда волны;

$\omega$  — циклическая частота колебаний точек волны;

$y$  — расстояние от источника колебаний до наблюдаемой точки;

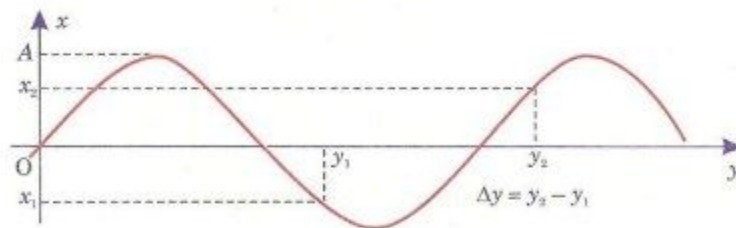
$\varphi = \omega \left( t - \frac{y}{v} \right) = \omega t - ky$  — фаза волны в данной точке среды;

$k = \frac{\omega}{v}$  — волновое число;

$v$  — скорость распространения волны.

! **Амплитуда волны** — это максимальное смещение точки волны от положения равновесия при колебаниях.

! **Частота колебаний точек волны** определяется частотой колебаний источника:



**Разность фаз** между двумя точками волны

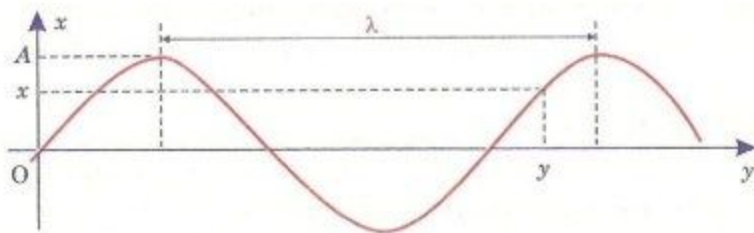
$$\Delta \varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = (\omega t - ky_1) - (\omega t - ky_2) = \frac{\omega}{v} (y_2 - y_1) = \frac{\omega}{v} \Delta y.$$



## МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ

## Длина волны

Длина волны  $\lambda$  — это расстояние, которое проходит фронт волны за время, равное периоду колебаний  $T$ . Другими словами, длина волны  $\lambda$  равна расстоянию между ближайшими точками среды, колеблющимися в одинаковой фазе:



$$\lambda = vT \Rightarrow \lambda = \frac{v}{\nu} \Rightarrow v = \lambda \nu$$

Волновое число можно выразить через длину волны  $\lambda$ :

$$k = \frac{\omega}{v} = \frac{2\pi\nu}{\lambda\nu} = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$$x = A \sin[\omega t - ky] = A \sin\left[\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} y\right]$$

Разность фаз между двумя точками волны

$$\Delta\varphi = \frac{\omega}{v} \Delta y = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta y$$

## Звуковые волны

Звуковые волны — это упругие волны, имеющие частоту от 16 до 20 000 Гц. Воздействуя на органы слуха человека, они вызывают звуковые ощущения.

Механические колебания с частотой  $\nu < 16$  Гц называются **инфразвуковыми**, а с частотой  $\nu > 2 \cdot 10^4$  Гц — **ультразвуковыми**.

Звуковые волны характеризуются:

- **силой звука**, определяемой амплитудой колебаний;
- **высотой тона**, зависящей от частоты звука;
- **скоростью распространения**, которая зависит от механических свойств среды и от ее температуры;
- **интенсивностью звука**, определяемой мощностью, переносимой волной через единичную площадку перпендикулярно к направлению ее распространения.

! В системе СИ интенсивность звука измеряется в  $1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ .

Уровень интенсивности звука (уровень громкости)  $L_p$  определяется по формуле

$$L_p = 10 \cdot \lg \left( \frac{I}{I_0} \right),$$

где  $I$  — интенсивность данного звука;

$I = 1 \frac{\text{пВт}}{\text{м}^2}$  — минимальная интенсивность звука, улавливаемого ухом человека.

! Единица уровня интенсивности звука  $[L_p] = 1$  Б (бел).

! Обычно используют в качестве единицы уровня интенсивности  $[L_p] = 1$  дБ (децибел) = 0,1 Б.



## МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ

## Эффект Доплера

**Эффект Доплера** – это явление изменения частоты колебаний, которые принимаются приемником, при движении источника этих колебаний и приемника друг относительно друга. Предположим, что источник и приемник звука движутся вдоль одной прямой.

1. **Источник и приемник покоятся относительно среды.** Распространяясь в среде, волна достигнет приемника и вызовет колебания в нем с частотой

$$\nu = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{vT} = \frac{1}{T} = \nu_0,$$

где  $\nu_0$  — частота колебаний источника.

2. **Приемник приближается к источнику, а источник покоится.** Скорость распространения волны относительно приемника увеличится и станет равной  $v + v_{\text{пр}}$ . Тогда

$$\nu = \frac{v + v_{\text{пр}}}{\lambda} = \frac{v + v_{\text{пр}}}{vT} = \nu_0 \frac{v + v_{\text{пр}}}{v}.$$

3. **Источник приближается к приемнику, а приемник покоится.** За время, равное периоду колебаний источника  $T$ , излученная им волна пройдет расстояние  $\lambda_1 = vT$ . За это же время сам источник пройдет в направлении волны расстояние  $\lambda_2 = v_{\text{ист}}T$ . Поэтому длина волны, распространяющейся в направлении источника, станет равной  $\lambda = \lambda_1 - \lambda_2 = (v - v_{\text{ист}})T$ . Тогда

$$\nu = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{(v - v_{\text{ист}})T} = \nu_0 \frac{v}{v - v_{\text{ист}}}.$$

4. **Источник и приемник движутся относительно друг друга:**

$$\nu = \nu_0 \frac{(v \pm v_{\text{пр}})}{(v \mp v_{\text{ист}})}.$$

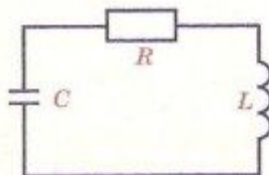
- ! При этом верхний знак берется, если при движении приемника и источника происходит их **сближение**, нижний знак — в случае их **взаимного удаления**.

# ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ



## ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

### Колебательный контур



Простейшей электрической колебательной системой является **колебательный контур**. Это цепь, состоящая из последовательно соединенных катушки индуктивностью  $L$ , конденсатора емкостью  $C$  и резистора сопротивлением  $R$ . Если сопротивление контура  $R = 0$ , то контур называют **идеальным**.

Свободные электромагнитные колебания в контуре — это периодические изменения заряда  $q$ , напряжения  $u$  на обкладках конденсатора и силы тока  $i$ , текущего через катушку индуктивности и резистор.

! Колебания в контуре можно вызвать, сообщив обкладкам конденсатора некоторый начальный заряд или возбуждив в катушке индуктивности электрический ток (например, путем включения внешнего магнитного поля, пронизывающего витки катушки). Процесс колебаний в такой цепи заключается в периодической перезарядке конденсатора под действием ЭДС самоиндукции и в протекании переменного тока

! Колебания в контуре можно вызвать, сообщив обкладкам конденсатора некоторый начальный заряд или возбуждив в катушке индуктивности электрический ток (например, путем включения внешнего магнитного поля, пронизывающего витки катушки). Процесс колебаний в такой цепи заключается в периодической перезарядке конденсатора под действием ЭДС самоиндукции и в протекании переменного тока

### Идеальный колебательный контур

В идеальном колебательном контуре устанавливаются **незатухающие гармонические колебания**, при которых величины заряда  $q$ , напряжения  $u$  и силы тока  $i$  изменяются по следующим законам:

$$q = q_m \cos \omega_0 t;$$

$$u = \frac{q}{C} = \frac{q_m \cos \omega_0 t}{C} = U_m \cos \omega_0 t;$$

$$i = q' = q_m \omega_0 \cos \left( \omega_0 t - \frac{\pi}{2} \right) = I_m \cos \left( \omega_0 t - \frac{\pi}{2} \right),$$

где  $q$ ,  $u$ ,  $i$  — мгновенные значения заряда, напряжения и силы тока соответственно;

$q_m$ ,  $U_m = q_m / C$ ,  $I_m = q_m \omega_0$  — амплитудные значения заряда, напряжения и силы тока соответственно;

$\omega_0$  — циклическая частота свободных (собственных) колебаний в контуре.

! Колебания заряда и напряжения совершаются в одной и той же фазе, а колебания силы тока отстают по фазе от напряжения на конденсаторе на  $\frac{\pi}{2}$ .

Период свободных электромагнитных колебаний в идеальном контуре определяется **формулой Томсона**

$$T_0 = 2\pi \sqrt{LC}.$$

Частота свободных электромагнитных колебаний

$$\nu_0 = \frac{1}{T_0} = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}.$$

Циклическая частота свободных электромагнитных колебаний

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0} = 2\pi \nu_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

При колебаниях в контуре происходит непрерывный переход энергии электрического поля конденсатора в энергию магнитного поля катушки индуктивности, и наоборот. При незатухающих колебаниях энергия, запасенная в колебательном контуре в начальный момент времени, не изменяется с течением времени и равна

$$W = \frac{CU_m^2}{2} = \frac{Cu^2}{2} + \frac{Li^2}{2} = \frac{LI_m^2}{2} = \text{const}.$$



## ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

### Реальный колебательный контур

В любом реальном колебательном контуре сопротивление  $R$  (активное сопротивление катушки индуктивности и соединительных проводов) всегда отлично от нуля. Поэтому в таком контуре происходят **потери энергии** (энергия, запасенная в контуре, переходит во внутреннюю энергию) и колебания с течением времени затухают.

Циклическая частота, с которой совершаются **затухающие колебания**, меньше частоты  $\omega_0$  собственных колебаний.

В общем случае период затухающих колебаний определяется выражением

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}}$$

Однако если  $R$  мало (затухание колебаний незначительно), то с достаточно хорошим приближением можно пользоваться формулами

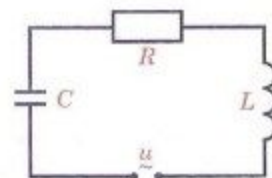
$$T = 2\pi\sqrt{LC};$$

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}};$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

### Вынужденные электромагнитные колебания

**Незатухающие гармонические колебания** в реальном колебательном контуре можно получить, если непрерывно пополнять энергию контура. Для этого необходимо включить последовательно с элементами контура переменную ЭДС или, разорвав контур, подать на образовавшиеся контакты переменное напряжение  $u$ :



$$u = U_m \cos \omega t,$$

где  $u$  — мгновенное значение напряжения;

$U_m$  — амплитуда напряжения;

$\omega$  — циклическая частота переменного напряжения.

После замыкания цепи в контуре установятся **вынужденные колебания тока**, частота которых совпадает с частотой подаваемого напряжения:

$$i = I_m \cos(\omega t + \varphi),$$

где  $i$  — мгновенное значение силы тока;

$I_m$  — амплитудное значение силы тока;

$\varphi$  — сдвиг фаз между током и напряжением.



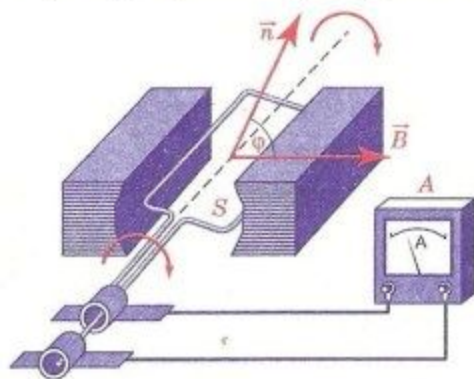
## ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

### Переменный электрический ток

Любой ток, изменяющийся по времени, называют **переменным**. Чаще всего под **переменным электрическим током** понимают ток, изменяющийся по **гармоническому закону**.

! Переменное напряжение, необходимое для возникновения переменного тока, получается с помощью **генератора переменного тока\***.

В простейшей модели генератора переменное напряжение возбуждается в замкнутой рамке сопротивлением  $R$ , которая равномерно вращается в однородном магнитном поле.



В этом случае сила переменного тока, текущего в рамке, определяется в соответствии с законом Ома:

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m \cos \omega t}{R} = I_m \cos \omega t, \quad I_m = \frac{U_m}{R}.$$

\* См. «Принцип действия простейшего генератора переменного тока», раздел «Электромагнитная индукция».

Колебания напряжения на активном сопротивлении рамок совпадают по фазе с колебаниями силы тока.

Для характеристики действия переменного тока вводятся понятия **действующей силы тока  $I$**  и **действующего напряжения  $U$** .

**Действующей силой переменного тока  $I$**  называют силу такого постоянного тока, который в том же проводнике и за то же время выделяет такое же количество тепла, что и данный переменный ток.

**Действующим напряжением переменного тока  $U$**  называют напряжение такого постоянного тока, который в том же проводнике и за то же время выделяет такое же количество тепла, что и данный переменный ток.

Действующие значения силы тока  $I$  и напряжения  $U$  определяются формулами:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}};$$

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}},$$

где  $I, U$  — действующие значения тока и напряжения;

$I_m, U_m$  — амплитудные значения тока и напряжения.

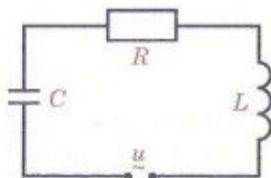
! Амперметры и вольтметры, включенные в электрическую цепь переменного тока, измеряют действующие значения силы тока и напряжения.



## ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

### Закон Ома для последовательного участка цепи переменного тока

В электрической цепи, состоящей из последовательно включенных активного сопротивления  $R$ , индуктивности  $L$ , емкости  $C$  и источника напряжения ( $u = U_m \cos \omega t$ ), возникает переменный ток, сила которого определяется выражением



$$i = I_m \cos(\omega t + \varphi),$$

где  $\varphi$  — сдвиг фаз между током и напряжением.

Амплитуда силы тока определяется законом Ома:

$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} = \frac{U_m}{Z}.$$

Аналогичное равенство справедливо и для действующих значений напряжения и силы тока

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} = \frac{U}{Z}.$$

Величину  $Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$  называют полным сопротивлением цепи переменного тока.

Величину  $R$  называют активным сопротивлением.

Величину  $X_L = \omega L$  — индуктивным сопротивлением.

Величину  $X_C = \frac{1}{\omega C}$  — емкостным сопротивлением.

Величину  $X = X_L - X_C = \omega L - \frac{1}{\omega C}$  — реактивным сопротивлением.

! Сопротивление  $R$  называют активным, так как на нем происходит выделение теплоты (согласно закону Джоуля-Ленца). Сопротивление  $X$  называют реактивным, так как на нем не происходит выделения тепла, а происходит только переход энергии электрического поля в энергию магнитного поля.

Сдвиг фаз  $\varphi$  между током и напряжением определяется выражением

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X_L - X_C}{R} = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}.$$

Мгновенная мощность  $P$  в цепи переменного тока

$$P = iu = I_m \cos(\omega t - \varphi) U_m \cos \omega t = \frac{1}{2} I_m U_m (\cos \varphi + \cos(2\omega t - \varphi)).$$

Среднее значение мощности за длительный промежуток времени определяется формулой

$$\langle P \rangle = \frac{1}{2} I_m U_m \cos \varphi = IU \cos \varphi.$$

Величину  $\cos \varphi$  называют коэффициентом мощности.

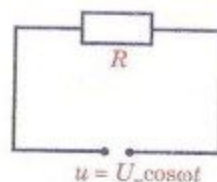


## ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

Активное сопротивление  
в цепи переменного тока

Если цепь переменного тока содержит только активное сопротивление  $R$  ( $X_L = 0$ ,  $X_C = 0$ ), то закон Ома будет иметь следующий вид:

$$I_m = \frac{U_m}{R}, \text{ или } I = \frac{U}{R}.$$

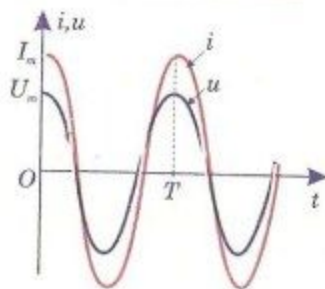


Сдвиг фаз между током и напряжением

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{0}{R} = 0 \Rightarrow \varphi = 0.$$

Сила тока будет изменяться по закону

$$i = I_m \cos \omega t = \frac{U_m}{R} \cos \omega t.$$



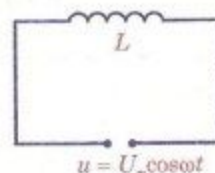
Средняя мощность тока

$$\langle P \rangle = \frac{1}{2} I_m U_m = IU.$$

Индуктивное сопротивление  
в цепи переменного тока

Если цепь переменного тока содержит только индуктивное сопротивление  $X_L$  ( $R \rightarrow 0$ ,  $X_C = 0$ ), то закон Ома будет иметь следующий вид:

$$I_m = \frac{U_m}{\omega L}, \text{ или } I = \frac{U}{\omega L}.$$



! В реальной цепи переменного тока всегда присутствует активное сопротивление  $R$ . Поэтому условие  $R \rightarrow 0$  выполняется, если  $\omega L \gg R$ .

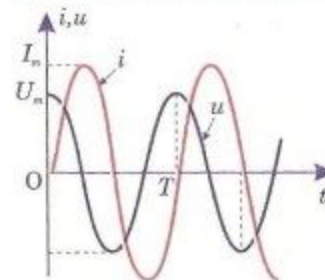
Сдвиг фаз между током и напряжением

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X_L}{R} \rightarrow +\infty \Rightarrow \varphi \rightarrow \frac{\pi}{2}.$$

! Напряжение на индуктивном сопротивлении опережает силу тока по фазе на  $\frac{\pi}{2}$ .

Сила тока будет изменяться по закону

$$i = I_m \cos \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right) = \frac{U_m}{\omega L} \cos \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right).$$



Средняя мощность тока  $\langle P \rangle = 0$ .

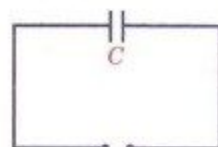


# ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

## Емкостное сопротивление в цепи переменного тока

Если цепь переменного тока содержит только емкостное сопротивление  $X_C$  ( $R \rightarrow 0$ ,  $X_L = 0$ ), то закон Ома будет иметь следующий вид:

$$I_m = \frac{U_m}{\frac{1}{\omega C}} = \omega C U_m, \text{ или } I = \omega C U.$$



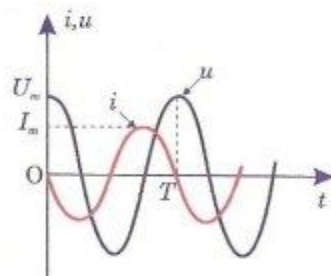
$$u = U_m \cos \omega t$$

! Так как цепи переменного тока всегда присутствует активное сопротивление  $R$ , то условие  $R \rightarrow 0$  выполняется, если  $\frac{1}{\omega C} \gg R$ .

Сдвиг фаз между током и напряжением

$$\operatorname{tg} \varphi = -\frac{X_C}{R} \rightarrow -\infty \Rightarrow \varphi \rightarrow -\frac{\pi}{2}.$$

! Сила тока на емкостном сопротивлении опережает напряжение по фазе на  $\frac{\pi}{2}$ .



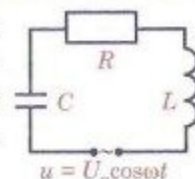
Сила тока будет изменяться по закону

$$i = I_m \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = U_m \omega C \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right).$$

Средняя мощность тока  $\langle P \rangle = 0$ .

## Метод векторных диаграмм

Пусть в сеть переменного тока включены последовательно соединенные резистор сопротивлением  $R$ , конденсатор емкостью  $C$  и катушка индуктивностью  $L$ . Определим амплитудное значение силы тока  $I_m$  в цепи.



Во всех последовательно соединенных элементах цепи колебания силы тока происходят по одному закону. Для определения амплитуды силы тока воспользуемся методом векторных диаграмм. Построим векторную диаграмму. Направим ось токов горизонтально. Колебания напряжения на резисторе совпадают по фазе с колебаниями силы тока, поэтому направление вектора  $U_{mR}$  совпадает с направлением

оси токов. Сдвиг фаз между напряжением и током на катушке равен  $\frac{\pi}{2}$ , сдвиг фаз между напряжением и током на конденсаторе равен  $-\frac{\pi}{2}$ . Поэтому вектор  $U_{mL}$  поворачиваем на угол  $\frac{\pi}{2}$  относительно оси токов против часовой стрелки, а вектор  $U_{mC}$  поворачиваем на угол  $\frac{\pi}{2}$  относительно оси токов по часовой стрелке. Из диаграммы видно, что модуль напряжения  $U_m$  равен

$$U_m^2 = U_{mR}^2 + (U_{mL} - U_{mC})^2 = (I_m R)^2 + (I_m X_L - I_m X_C)^2;$$

$$U_m^2 = I_m^2 \left( R^2 + (X_L - X_C)^2 \right) = I_m^2 \left( R^2 + \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2 \right);$$

$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}} = \frac{U_m}{Z}.$$

Используя метод векторных диаграмм, мы получили закон Ома для цепи переменного тока.



## ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

### Резонанс в электрической цепи переменного тока

Из закона Ома для последовательного участка цепи переменного тока  $I_m = \frac{U_m}{Z}$  следует, что

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

амплитуда переменного тока зависит не только от параметров цепи  $R, L, C, U_m$ , но и от частоты переменного тока  $\omega$ .

Если  $\omega L - \frac{1}{\omega C} = 0$ , то полное сопротивление принимает минимально возможное значение  $Z = R$ . Так как полное сопротивление минимально, то амплитуда силы тока будет максимальной

$$I_m = \frac{U_m}{R}$$

Частота, при которой будет выполняться это условие, равна частоте собственных колебаний:

$$\omega L - \frac{1}{\omega C} = 0 \Rightarrow \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega_0$$

Значит, при частоте вынуждающего напряжения, совпадающей с частотой собственных колебаний, происходит резкое возрастание амплитуды силы тока.

Явление резкого возрастания амплитуды силы тока при приближении частоты вынуждающего напряжения к частоте собственных колебаний называется **явлением электрического резонанса**.

Одновременно с ростом амплитуды силы тока при резонансе резко возрастают амплитудные напряжения на конденсаторе и катушке индуктивности. Эти напряжения при  $\omega = \omega_0$  одинаковы и равны

$$U_{mL}^{\text{рез}} = I_m X_L = \omega L \frac{U_m}{R} = \omega_0 L \frac{U_m}{R} = \frac{L}{\sqrt{LC}} \frac{U_m}{R} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} U_m$$

$$U_{mC}^{\text{рез}} = I_m X_C = \frac{1}{\omega C} \frac{U_m}{R} = \frac{1}{\omega_0 C} \frac{U_m}{R} = \frac{\sqrt{LC}}{C} \frac{U_m}{R} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} U_m$$

Величину  $Q_0 = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$  называют **добротностью контура**.

Если величина  $Q_0 \gg 1$ , то напряжение на конденсаторе или катушке может во много раз превосходить вынуждающее напряжение. Поэтому электрический резонанс в последовательной цепи переменного тока еще называют **резонансом напряжений**.

Так как при резонансе  $\omega L - \frac{1}{\omega C} = 0$ , то

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} = 0 \Rightarrow \varphi = 0$$

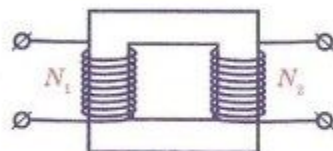
! При резонансе сдвиг фаз  $\varphi$  между силой тока  $i$  и напряжением  $u$  становится равным нулю.



# ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

## Трансформатор

Переменный ток имеет преимущество перед постоянным током, поскольку его действующее напряжение  $U$  и силу тока  $I$  можно в очень широких пределах преобразовывать (трансформировать) почти без потерь мощности. Для этого служит устройство, называемое **трансформатором**.



Простейший трансформатор состоит из двух обмоток, одна из которых называется **первичной**, а другая **вторичной**.

Обмотки трансформатора расположены на общем сердечнике. На **первичную обмотку** подается исходное напряжение, а со **вторичной обмотки** снимается преобразованное напряжение.

! Действие трансформатора основано на явлении электромагнитной индукции.

Первичную обмотку трансформатора подключают к источнику переменной ЭДС с действующим значением  $U_1$  ( $\varepsilon_1 = U_1$ ). Так как обмотки находятся на общем сердечнике, то магнитный поток, созданный переменным током в первичной обмотке, пронизывает вторичную обмотку. По закону Фарадея–Ленца

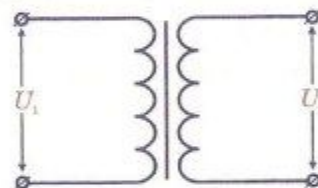
$$\varepsilon_1 = -N_1 \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad \text{и} \quad \varepsilon_2 = -N_2 \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}.$$

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{-N_1 \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}}{-N_2 \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}} = \frac{N_1}{N_2},$$

где  $N_1$  и  $N_2$  — число витков в первичной и вторичной обмотках соответственно.

## Холостой ход трансформатора

Режимом **холостого хода** трансформатора называется режим с разомкнутой вторичной обмоткой. В этом случае напряжение  $U_2$  на вторичной обмотке равно индуцируемому в ней ЭДС  $\varepsilon_2$ .



**Коэффициент трансформации  $k$**  — это величина, равная отношению числа витков в первичной обмотке к числу витков во вторичной обмотке:

$$k = \frac{N_1}{N_2}.$$

В режиме холостого хода коэффициент трансформации  $k$  равен

$$k = \frac{N_1}{N_2} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{U_1}{U_2}.$$

При  $k > 1$  трансформатор является **понижающим**, при  $k < 1$  — **повышающим**.



## ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

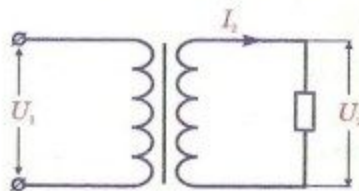
### Трансформатор (продолжение)

#### Рабочий ход трансформатора

**Рабочим режимом** трансформатора называется режим, когда во вторичную обмотку включена нагрузка с некоторым сопротивлением.

В этом случае коэффициент трансформации  $k$  равен

$$k = \frac{N_1}{N_2} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{U_1}{U_2 + I_2 r},$$



где  $I_2$  — действующее значение силы тока, текущего во вторичной обмотке;

$r$  — сопротивление вторичной обмотки.

КПД трансформатора

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 I_2}{U_1 I_1},$$

где  $P_1$  — мощность, потребляемая первичной обмоткой;

$P_2$  — мощность, выделяемая во вторичной обмотке.

Так как потери мощности в трансформаторе незначительны (в современных мощных трансформаторах они не превышают 2–3%), то на основании закона сохранения энергии можно считать, что

$$I_1 U_1 \approx I_2 U_2 \quad \text{или} \quad U_1 / U_2 \approx I_1 / I_2,$$

где  $I_1$  и  $I_2$  — действующие значения силы тока в первичной и вторичной обмотках.

! Повышая с помощью трансформатора напряжение в несколько раз, мы во столько же раз уменьшаем силу тока, и наоборот.

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

### Электромагнитные волны

**Электромагнитной волной** называется периодический во времени и пространстве процесс распространения электромагнитного поля.

В электромагнитной волне вектор напряженности  $\vec{E}$  электрического поля и вектор индукции  $\vec{B}$  магнитного поля перпендикулярны друг к другу и перпендикулярны к направлению распространения волны (к вектору скорости  $\vec{v}$ ), т.е. электромагнитная волна является **поперечной**. Колебания векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  в любой точке пространства совершаются в одной и той же фазе.

**Скорость распространения электромагнитных волн** в вакууме равна скорости света ( $c = 3 \cdot 10^8$  м/с). В среде электромагнитные волны распространяются со **скоростью**

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

где  $\varepsilon$  и  $\mu$  — диэлектрическая и магнитная проницаемости среды соответственно.

Для электромагнитных волн, так же как и для любых других волн, справедливы соотношения

$$\lambda = vT = \frac{v}{\nu} \Rightarrow v = \lambda \cdot \nu = \frac{\lambda}{T},$$

где  $\lambda$  — длина волны;  $\nu$  — частота;

$T$  — период электромагнитных колебаний.

Источниками электромагнитных волн являются переменные токи и колеблющиеся (движущиеся с ускорением) электрические заряды (вибраторы).

Для электромагнитных волн, как и для других волновых процессов, наблюдаются явления отражения, преломления, интерференции, дифракции, поляризации и др.



## ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

### Шкала электромагнитных волн

В таблице приведена классификация электромагнитных волн в зависимости от их частоты (длины волны).

Виды излучения	Частота, Гц	Длина волны, м
Низкочастотные волны	$< 3 \cdot 10^3$	$> 10^5$
Радиоволны	$3 \cdot 10^3 — 3 \cdot 10^9$	$10^5 — 10^{-1}$
Микроволны	$3 \cdot 10^9 — 10^{12}$	$10^{-1} — 10^{-4}$
Инфракрасное излучение	$10^{12} — 4,3 \cdot 10^{14}$	$3 \cdot 10^{-4} — 7 \cdot 10^{-7}$
Видимое излучение	$4,3 \cdot 10^{14} — 7,5 \cdot 10^{14}$	$7 \cdot 10^{-7} — 4 \cdot 10^{-7}$
Ультрафиолетовое излучение	$7,5 \cdot 10^{14} — 10^{16}$	$4 \cdot 10^{-7} — 3 \cdot 10^{-8}$
Рентгеновские лучи	$10^{16} — 3 \cdot 10^{18}$	$3 \cdot 10^{-8} — 10^{-10}$
Гамма-лучи	$3 \cdot 10^{18} — 3 \cdot 10^{29}$	$10^{-10} — 10^{-21}$

### Классификация радиоволн

Виды радиоволн	Частота, Гц	Длина волны, м
Сверхдлинные	$< 3 \cdot 10^4$	$> 10^4$
Длинные (ДВ)	$3 \cdot 10^4 — 3 \cdot 10^5$	$10^3 — 10^4$
Средние (СВ)	$3 \cdot 10^5 — 3 \cdot 10^6$	$10^2 — 10^3$
Короткие (КВ)	$3 \cdot 10^6 — 3 \cdot 10^7$	$3 \cdot 10^1 — 7 \cdot 10^2$
Ультракороткие (УКВ)	$3 \cdot 10^7 — 3 \cdot 10^9$	$0,1 — 10$

## ОПТИКА



## ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

**Оптика** — раздел физики, в котором изучают свойства света, его физическую природу и его взаимодействие с веществом.

**Геометрическая оптика** — часть оптики, в которой изучают законы распространения света в прозрачных средах на основе представлений о нем как о совокупности световых лучей.

Под **световым лучом** понимают линию, вдоль которой распространяется световая энергия.

! В геометрической оптике волновая природа света не учитывается.

### Закон прямолинейного распространения света

**Закон прямолинейного распространения света:** свет в прозрачной однородной среде распространяется прямолинейно (световые лучи представляют собой **прямые линии**).

### Закон независимости световых лучей

**Закон независимости световых лучей:** лучи при пересечении не возмущают друг друга.

! Этот закон справедлив при не слишком больших интенсивностях света.

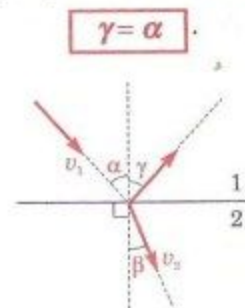
### Принцип Ферма

**Принцип Ферма:** свет распространяется по такому пути, для прохождения которого ему требуется минимальное время.

## Законы отражения и преломления света

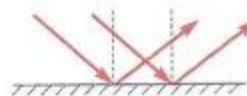
При падении световых лучей на границу раздела двух прозрачных сред происходит **отражение** и **преломление** света, которое описывается следующими законами.

**Закон отражения:** луч падающий, луч отраженный и перпендикуляр к границе раздела двух сред, восстановленный в точке падения луча, лежат в одной плоскости. Угол отражения  $\gamma$  равен углу падения  $\alpha$ :

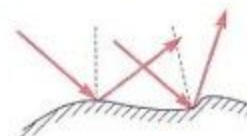


Существует два вида отражения: **зеркальное** и **диффузное**.

Если параллельный пучок лучей после отражения остается параллельным, то такое отражение называют **зеркальным**.



Если параллельный пучок лучей после отражения не остается параллельным, то такое отражение называют **диффузным**.





## ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

Законы отражения и преломления света  
(продолжение)

**Закон преломления света:** луч падающий, луч преломленный и перпендикуляр к границе раздела двух сред, восстановленный в точке падения луча, лежат в одной плоскости. Отношение синуса угла падения  $\alpha$  к синусу угла преломления  $\beta$  есть величина постоянная для двух данных сред:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21},$$

где  $n_1$  и  $n_2$  — абсолютные показатели преломления первой и второй среды соответственно;

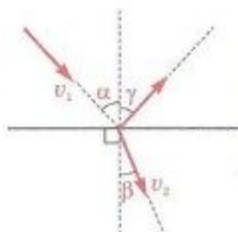
$n_{21}$  — относительный показатель преломления второй среды относительно первой.

! Необходимо помнить, что в оптике все углы отсчитываются от перпендикуляра к поверхности, восстановленного в точках падения лучей.

**Абсолютный показатель преломления среды  $n$**  — это физическая величина, показывающая, во сколько раз скорость света в вакууме больше, чем в данной среде:

$$n = \frac{c}{v},$$

где  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с — скорость распространения света в вакууме.



**Относительный показатель преломления** второй среды относительно первой  $n_{21}$  — физическая величина, показывающая, во сколько раз скорость света в первой среде больше, чем во второй среде:

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{c}{v_2} \cdot \frac{v_1}{c} = \frac{v_1}{v_2},$$

где  $v_1$  и  $v_2$  — скорость распространения света в первой и второй среде соответственно.

Среда, имеющая больший абсолютный показатель преломления, называется **оптически более плотной средой** по сравнению со средой, имеющей меньший абсолютный показатель преломления.

Среда, имеющая меньший абсолютный показатель преломления, называется **оптически менее плотной средой** по сравнению со средой, имеющей больший абсолютный показатель преломления.

! Абсолютный показатель преломления для данного вещества имеет одно определенное значение и является характеристикой этого вещества, тогда как относительный показатель преломления  $n_{21}$  может иметь различные значения в зависимости от того, с какой другой средой граничит данная среда.

! Явления отражения и преломления света лежат в основе действия разнообразных зеркал, призм и линз, являющихся основными деталями оптических приборов, формирующих изображения предметов.



## ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

## Закон полного внутреннего отражения

Рассмотрим переход светового луча из оптически **более плотной** среды в оптически **менее плотную** среду ( $n_1 > n_2$  или  $n_{21} < 1$ ). Из закона преломления следует, что  $\sin \beta > \sin \alpha$  или  $\beta > \alpha$ , т.е. угол преломления больше угла падения  $\alpha$ .

При некотором угле падения  $\alpha_{\text{пр}}$  синус угла преломления станет равным единице, т.е. преломленный луч скользит по поверхности раздела двух сред. Тогда имеем

$$\sin \alpha_{\text{пр}} = n_{21} = \frac{n_2}{n_1},$$

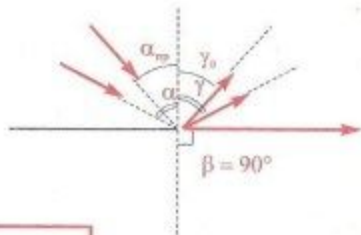
где  $\alpha_{\text{пр}}$  — предельный угол падения.

При угле падения  $\alpha > \alpha_{\text{пр}}$  свет полностью отражается от границы раздела, т.е. возникает явление **полного отражения света**, которое часто называют **полным внутренним отражением**.

Если второй средой является воздух или вакуум, для которого  $n_2 = 1$ , то

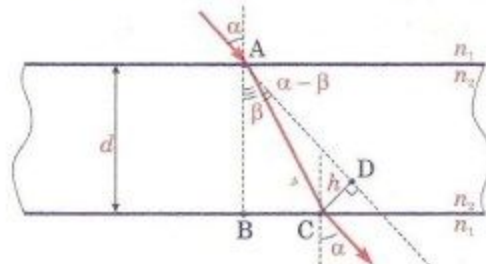
$$\sin \alpha_{\text{пр}} = \frac{1}{n_1}.$$

! Явление полного отражения света можно наблюдать только при переходе света **из оптически более плотной среды в оптически менее плотную среду** при условии, что угол падения  $\alpha$  луча больше предельного угла  $\alpha_{\text{пр}}$ .



## Ход лучей в плоскопараллельной пластинке

При падении света на плоскопараллельную пластинку луч света, вышедший из пластинки, **параллелен** падающему лучу и смещен на величину  $h$ .



Величину смещения  $h$  можно найти следующим образом:

– из закона преломления света найдем угол  $\beta$ :

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow \sin \beta = \frac{n_1}{n_2} \sin \alpha \Rightarrow \beta = \arcsin \left( \frac{n_1}{n_2} \sin \alpha \right);$$

– из треугольника ABC найдем  $l = AC$

$$l = \frac{d}{\cos \beta} = \frac{d}{\sqrt{1 - \sin^2 \beta}} = \frac{d}{\sqrt{1 - \left( \frac{n_1}{n_2} \sin \alpha \right)^2}} = \frac{d \cdot n_2}{\sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \alpha}};$$

– из треугольника ACD найдем  $h$

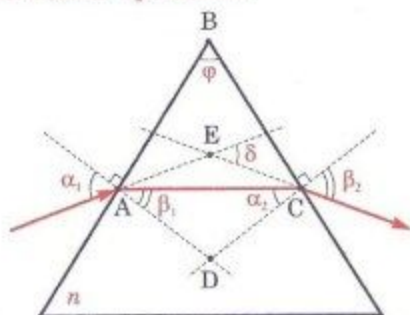
$$h = l \cdot \sin(\alpha - \beta) = \frac{d \cdot n_2 \sin(\alpha - \beta)}{\sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \alpha}}.$$



## ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

## Ход лучей в призме

При прохождении света через стеклянную призму (призма находится в воздухе), лучи света **отклоняются** к основанию призмы. Грани, через которые проходит луч, называются **преломляющими гранями**.



Угол  $\varphi$  между преломляющими гранями называют **преломляющим углом** призмы. Угол  $\delta$  между направлением входящего и выходящего лучей называют **углом отклонения**.

Угол отклонения  $\delta$  можно найти следующим образом:

– применим закон преломления для преломления света на передней грани призмы  $n$ , найдем угол  $\beta_1$ :

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \beta_1} = n \Rightarrow \sin \beta_1 = \frac{\sin \alpha_1}{n},$$

где  $n$  — абсолютный показатель преломления материала, из которого изготовлена призма;

– из четырехугольника ABCD найдем угол ADC:

$$360^\circ = \angle ADC + 90^\circ + 90^\circ + \varphi \Rightarrow \angle ADC = 180^\circ - \varphi;$$

– из треугольника ADC найдем угол  $\alpha_2$ :

$$180^\circ = \beta_1 + \alpha_2 + (180^\circ - \varphi) \Rightarrow \alpha_2 = \varphi - \beta_1;$$

– применим закон преломления для преломления света на второй грани призмы  $n$ , найдем угол  $\beta_2$ :

$$\frac{\sin \alpha_2}{\sin \beta_2} = \frac{1}{n} \Rightarrow \sin \beta_2 = n \sin \alpha_2;$$

– из четырехугольника AECD найдем угол  $\delta$ :

$$360^\circ = \alpha_1 + \beta_2 + (180^\circ - \varphi) + (180^\circ - \delta) \Rightarrow \delta = \alpha_1 + \beta_2 - \varphi.$$

Если  $\alpha_1 = \beta_2$ , а следовательно,  $\beta_1 = \alpha_2$ , то угол  $\delta$  отклонения луча от первоначального направления будет минимальным. В этом случае

$$\delta = \alpha_1 + \alpha_1 - \varphi \Rightarrow \alpha_1 = \frac{\varphi + \delta}{2};$$

$$\beta_1 = \varphi - \beta_1 \Rightarrow \beta_1 = \frac{\varphi}{2}.$$

Используя закон преломления света, получаем следующее соотношение:

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \beta_1} = n \Rightarrow \frac{\sin \left( \frac{\varphi + \delta}{2} \right)}{\sin \frac{\varphi}{2}} = n.$$



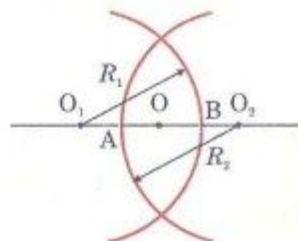
# ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

## Линзы

**Линзой** называется прозрачное тело, ограниченное двумя сферическими поверхностями.

Линза, толщина которой пренебрежимо мала по сравнению с радиусами кривизны  $R_1$  и  $R_2$  поверхностей, называется **тонкой**.

Линза, которая в середине толще, чем у краев, называется **выпуклой** линзой, а линза, которая у краев толще, чем в середине, называется **вогнутой** линзой.



Прямая, проходящая через центры  $O_1$  и  $O_2$  сферических поверхностей, которые ограничивают линзу, называется **главной оптической осью**.

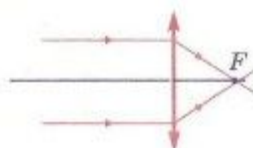
Если линза тонкая, то точки **A** и **B** расположены столь близко друг от друга, что их можно принять за одну точку, которую называют **оптическим центром линзы**.

! Лучи, проходящие через оптический центр линзы, **не преломляются**.

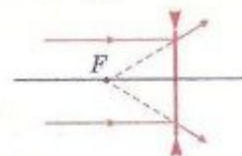
Прямая, проходящая через оптический центр тонкой линзы, не совпадающая с главной оптической осью, называется **побочной оптической осью**.

Плоскость, проходящая через оптический центр линзы и перпендикулярная к главной оптической оси, называется **главной плоскостью линзы**.

Точка, в которой после преломления на линзе пересекаются лучи, идущие параллельно главной оптической оси, называется **главным фокусом собирающей линзы**.



Точка, в которой после преломления на линзе пересекаются продолжения лучей, идущих параллельно главной оптической оси, называется **главным фокусом рассеивающей линзы**.



! Фокус собирающей линзы является **действительным**, а фокус рассеивающей линзы — **мнимым**.

Расстояние от оптического центра линзы до ее главного фокуса называется **фокусным расстоянием  $F$** .

Плоскость, проходящая через фокус линзы и перпендикулярная к главной оптической оси, называется **фокальной плоскостью**.

Точка пересечения фокальной плоскости и побочной оптической оси называется **побочным фокусом**.

**Оптическая сила линзы** — величина, обратная фокусному расстоянию линзы:

$$D = \frac{1}{F}$$

! Единица оптической силы линзы в системе СИ  $[D] = 1 \text{ дптр (диоптрия)} = 1 \text{ м}^{-1}$ .

! Для собирающей линзы  $D > 0$ , для рассеивающей линзы  $D < 0$ .

**Оптическую силу линзы** можно вычислить по формуле

$$D = \left( \frac{n_2}{n_1} - 1 \right) \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right),$$

где  $n_1$  и  $n_2$  — абсолютные показатели преломления для материала окружающей среды и линзы;

$R_1$  и  $R_2$  — радиусы кривизны поверхностей.

! Числовые значения **радиусов кривизны выпуклых поверхностей** в формулу подставляются со знаком «+», а **радиусов кривизны вогнутых поверхностей** — со знаком «-».



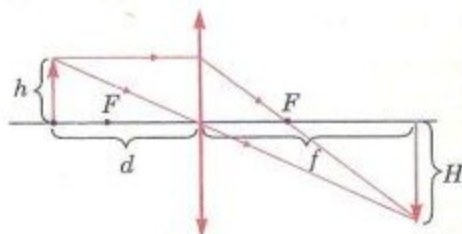
## ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

## Линзы (продолжение)

! Если абсолютный показатель преломления вещества линзы больше, чем окружающей среды  $\frac{n_2}{n_1} > 1$ , то выпуклые линзы будут собирающими ( $D > 0$ ). Выпуклые линзы будут рассеивающими только при  $\frac{n_2}{n_1} < 1$ .

**Формулой линзы** называется уравнение, связывающее фокусное расстояние  $F$ , расстояние от линзы до изображения  $f$  и расстояние от предмета до линзы  $d$ :

$$\pm \frac{1}{F} = \pm \frac{1}{f} \pm \frac{1}{d}$$



Производя вычисления по формуле тонкой линзы, необходимо учитывать знаки («+» или «-») величин  $d$ ,  $f$  и  $F$ .

**Правило знаков:** если линза собирающая, то ее фокус действительный и перед членом  $\frac{1}{F}$  ставится знак «+», если же линза рассеивающая, то ее фокус мнимый и перед членом  $\frac{1}{F}$  ставится знак «-».

Перед слагаемым  $\frac{1}{f}$  ставится знак «+», если изображение действительное, и знак «-» в случае мнимого изображения.

Перед слагаемым  $\frac{1}{d}$  ставится знак «+» в случае действительно светящейся точки (действительного предмета)

и знак «-», если она мнимая (т.е. если на линзу падает сходящийся пучок лучей, продолжения которых пересекаются в одной точке).

! В том случае, когда  $F$ ,  $f$  или  $d$  неизвестны, то перед соответствующими членами  $\frac{1}{F}$ ,  $\frac{1}{f}$  или  $\frac{1}{d}$  ставится знак «+». Но если в результате вычисления фокусного расстояния или расстояния от линзы до изображения или до источника (предмета) получается отрицательная величина, то это означает, что фокус, изображение или источник являются мнимыми.

При использовании формулы линзы следует помнить следующее:

- увеличенное изображение дает только собирающая линза\*. Причем возможны два случая: увеличенное действительное изображение и увеличенное мнимое изображение;
- рассеивающая линза дает только мнимое уменьшенное изображение;
- на экране можно увидеть только действительное изображение.

**Линейным увеличением  $\Gamma$**  называется отношение линейного размера (длины или ширины) изображения предмета к линейным размерам (длине или ширине) самого предмета:

$$\Gamma = \frac{H}{h} = \frac{f}{d}$$

где  $H$  и  $h$  — размеры изображения и предмета.

Увеличение, получаемое с помощью лупы с фокусным расстоянием  $F$ , находится по формуле

$$\Gamma = \frac{d_0}{F}$$

где  $d_0 = 25$  см — расстояние наилучшего зрения.

\* См. «Построение изображений в линзе».

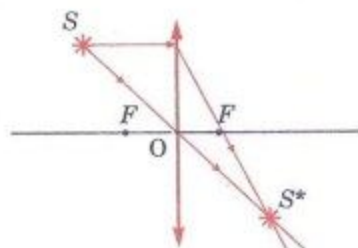


# ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

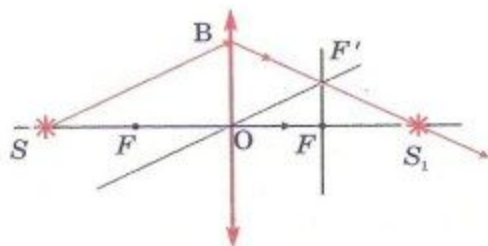
## Построение изображений в линзе

Основным свойством линзы является то, что световые лучи, исходящие из какой-либо точки предмета (источника), пройдя сквозь линзу, пересекаются также в одной точке (изображении) независимо от того, через какую часть линзы прошли лучи.

Если после преломления лучи, идущие от источника, пересекаются в одной точке за линзой, то они образуют **действительное** изображение:



Если прошедшие через линзу лучи расходятся и пересекаются не сами лучи, а их продолжения, то изображение является **мнимым**

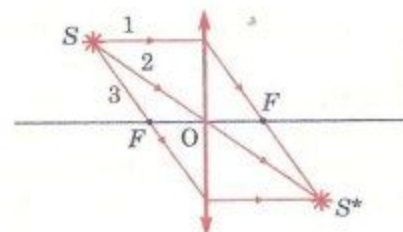


Для построения изображения в линзе точки предмета достаточно взять два луча, исходящих из этой точки, и найти их точку пересечения после преломления в линзе.

Для построения удобно брать лучи, ход которых заранее известен.

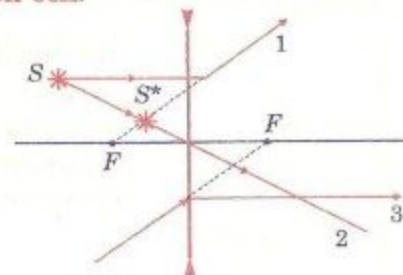
## Собирающая линза

- 1) луч, падающий на собирающую линзу **параллельно главной оптической оси**, после преломления **проходит через главный фокус линзы**;
- 2) луч, проходящий через **оптический центр линзы**, **не преломляется**;
- 3) луч, проходящий через **главный фокус линзы**, после преломления идет **параллельно главной оптической оси**;



## Рассеивающая линза

- 1) луч, падающий на рассеивающую линзу **параллельно главной оптической оси**, после преломления идет так, что его продолжение **проходит через главный фокус линзы**;
- 2) луч, проходящий через **оптический центр линзы**, **не преломляется**;
- 3) луч, продолжение которого **проходит через главный фокус линзы**, после преломления идет **параллельно главной оптической оси**;





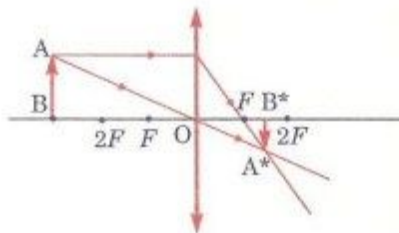
## ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

### Построение изображений в линзе (продолжение)

При построении изображение возможны шесть типичных случаев.

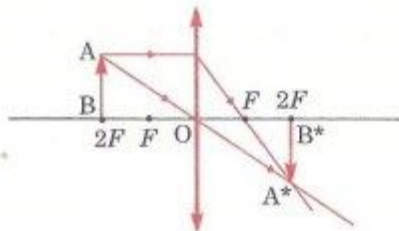
#### Собирающая линза

1) предмет находится перед двойным фокусом.



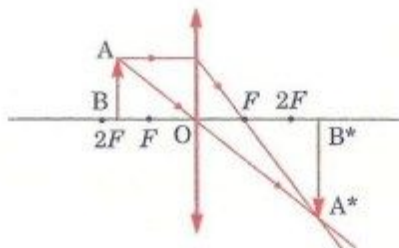
Изображение в этом случае **действительное, обратное, уменьшенное** (принцип работы фотоаппарата);

2) предмет находится в двойном фокусе.



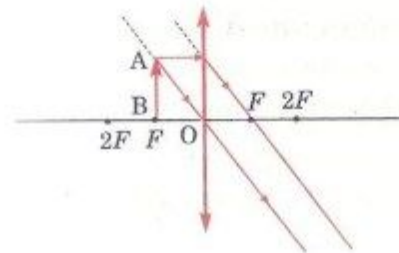
Изображение в этом случае **действительное, обратное и равное по величине предмету**;

3) предмет находится между двойным фокусом и фокусом.



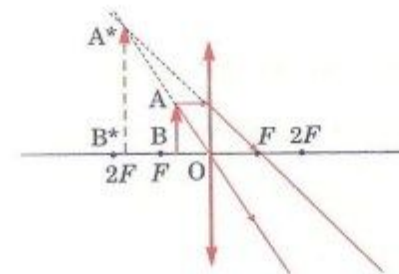
Изображение в этом случае **действительное, обратное, увеличенное** (принцип работы проектора);

4) предмет находится в фокусе.



Изображение в этом случае **на бесконечности**, так как лучи от каждой точки предмета после преломления в линзе идут **параллельно** друг другу;

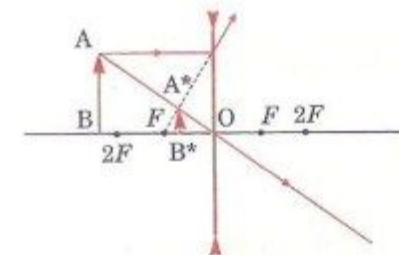
5) предмет находится между фокусом и линзой.



Изображение в этом случае **мнимое, прямое, увеличенное** (принцип работы лупы);

#### Рассеивающая линза

6) для рассеивающей линзы положение предмета не имеет значения.



Изображение получается всегда **мнимое, прямое, уменьшенное**.



## ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

### Построение изображения точки, расположенной на главной оптической оси собирающей линзы

Чтобы найти, где формируется изображение точки  $S$  собирающей линзой, проведем из точки  $S$  два луча: луч  $SO$  и луч  $SB$ .

Луч  $SO$ , который идет вдоль главной оптической оси, не преломляется, так как проходит через оптический центр линзы.

Луч  $SB$  падает на линзу в произвольной точке  $B$ .

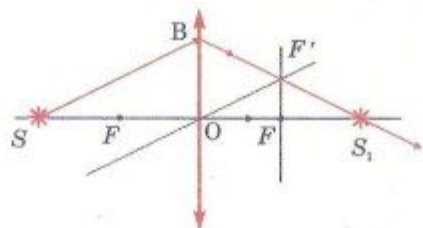
Проведем побочную ось, параллельную лучу  $SB$ .

Потом построим фокальную плоскость. Побочная ось пересечет фокальную плоскость в побочном фокусе  $F'$ .

После преломления в собирающей линзе через побочный фокус  $F'$  пройдут все лучи, параллельные данной побочной оптической оси.

Преломленный луч  $BF'$  пересечет луч  $SO$ , идущий вдоль главной оптической оси.

Точка  $S_1$  пересечения этих лучей является изображением точки  $S$ .



### Построение изображения точки, расположенной на главной оптической оси рассеивающей линзы

Чтобы найти, где формируется изображение точки  $S$  рассеивающей линзой, проведем из точки  $S$  два луча: луч  $SO$  и луч  $SB$ .

Луч  $SO$ , который идет вдоль главной оптической оси, не преломляется, так как проходит через оптический центр линзы.

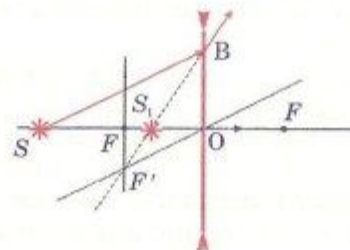
Луч  $SB$  падает на линзу в произвольной точке  $B$ .

Проведем побочную ось, параллельную лучу  $SB$ . Потом построим фокальную плоскость. Побочная ось пересечет фокальную плоскость в побочном фокусе  $F'$ .

После преломления в рассеивающей линзе через побочный фокус  $F'$  пройдут продолжения всех лучей, параллельных данной побочной оптической оси.

Продолжение преломленного луча  $BF'$  пересечет луч  $SO$ , идущий вдоль главной оптической оси.

Точка пересечения  $S_1$  является изображением точки  $S$ .





## ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

## Интерференция света

**Когерентностью** называется согласованное протекание нескольких колебательных или волновых процессов.

**Когерентными волнами** называются волны, имеющие постоянную разность фаз в каждой точке среды.

Источники называют **когерентными**, если они испускают **когерентные** волны.

**Интерференция света** — это явление наложения двух и более когерентных световых волн, в результате которого наблюдается усиление или ослабление результирующих световых колебаний в различных точках пространства, т.е. возникает **интерференционная картина**.

Если две когерентные световые волны распространяются в средах с показателями преломления  $n_1$  и  $n_2$  и проходят расстояния  $r_1$  и  $r_2$  соответственно, то между ними возникает дополнительная разность фаз  $\delta$ :

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda_0} (n_2 r_2 - n_1 r_1) = \frac{2\pi}{\lambda_0} (L_2 - L_1) = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta,$$

где  $L = n \cdot r$  — оптическая длина пути;

$\Delta = L_2 - L_1 = n_2 r_2 - n_1 r_1$  — оптическая разность хода.

Результат **интерференции света** при наложении двух когерентных волн с одинаковыми начальными фазами зависит от значения **оптической разности хода**.

**Интерференционные максимумы** для интенсивности света наблюдаются при выполнении следующего условия:

$$\Delta = 2m \frac{\lambda_0}{2} = m \lambda_0,$$

где  $m = 0, 1, 2, \dots$  — порядок максимума;  
 $\lambda_0$  — длина световой волны в вакууме.

**Интерференционные минимумы** для интенсивности света наблюдаются при выполнении следующего условия:

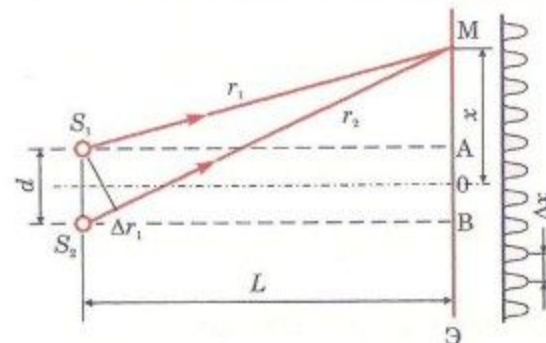
$$\Delta = (2m - 1) \frac{\lambda_0}{2} = \left(m - \frac{1}{2}\right) \lambda_0,$$

где  $m = 1, 2, \dots$  — порядок минимума.

Интерференция  
от двух когерентных источников

Имеется два когерентных источника света, находящихся на расстоянии  $d$  друг от друга и на расстоянии  $L$  ( $L \gg d$ ) от экрана. Экран и источники находятся в среде с абсолютным показателем преломления  $n$ .

Найдем положение **темных** и **светлых** полос на экране.



Для этого найдем оптическую разность хода между лучами 1 и 2, идущими от источников в рассматриваемую точку **М**. Точка **М** находится на расстоянии  $x$  от центра интерференционной картины.



## ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

### Интерференция от двух когерентных источников (продолжение)

$$\Delta = L_2 - L_1 = nr_2 - nr_1 = n(r_2 - r_1),$$

где  $L_2 = nr_2$  и  $L_1 = nr_1$  — оптические длины пути для второго и первого лучей соответственно;

$r_2$  и  $r_1$  — геометрическая длина пути второго и первого лучей соответственно.

Для треугольников  $S_2MB$  и  $S_1MA$  можно записать:

$$\left. \begin{aligned} r_2^2 &= L^2 + \left(x + \frac{d}{2}\right)^2 \\ r_1^2 &= L^2 + \left(x - \frac{d}{2}\right)^2 \end{aligned} \right\} \Rightarrow r_2^2 - r_1^2 = \left(x + \frac{d}{2}\right)^2 - \left(x - \frac{d}{2}\right)^2 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow (r_2 - r_1)(r_2 + r_1) = 2xd$$

Так как  $L \gg d$ , то можно считать, что  $r_2 + r_1 \approx 2L$ .

$$(r_2 - r_1)(r_2 + r_1) = 2xd \Rightarrow (r_2 - r_1)2L = 2xd \Rightarrow (r_2 - r_1) = \frac{xd}{L}.$$

Оптическая разность хода будет равна

$$\Delta = n(r_2 - r_1) = \frac{nx d}{L}.$$

Темные полосы видны в точках на экране, для которых разность хода лучей кратна нечетному числу полуволин:

$$\Delta = (2m - 1)\lambda/2, \quad m = 1, 2, \dots$$

Светлые полосы видны в точках на экране, для которых разность хода лучей кратна четному числу полуволин:

$$\Delta = 2m\lambda/2, \quad m = 0, 1, 2, \dots$$

Подставляя условие минимумов в выражение для оптической разности хода  $\Delta$ , получим положение **темных** полос:

$$\frac{nx d}{L} = (2m - 1)\frac{\lambda}{2} \Rightarrow x_m^{\min} = \frac{(2m - 1)\lambda L}{2nd},$$

где  $x_m^{\min}$  — положение темной полосы с номером  $m$ .

Подставляя условие максимумов в выражение для оптической разности хода  $\Delta$ , получим положение **светлых** полос:

$$\frac{nx d}{L} = 2m\frac{\lambda}{2} \Rightarrow x_m^{\max} = \frac{m\lambda L}{nd},$$

где  $x_m^{\max}$  — положение светлой полосы с номером  $m$ .

Расстояние  $\Delta x$  между соседними светлыми полосами (или соседними темными полосами) на экране будет равно

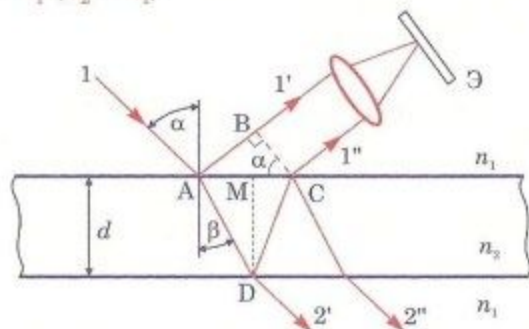
$$\Delta x = x_m^{\max} - x_{m-1}^{\max} = x_m^{\min} - x_{m-1}^{\min} = \frac{m\lambda L}{nd} - \frac{(m-1)\lambda L}{nd} = \frac{\lambda L}{nd}.$$



## ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

## Интерференция в тонких пленках

На тонкую плоскопараллельную пластинку с показателем преломления  $n_2$  и толщиной  $d$  под углом  $\alpha$  падает параллельный пучок света с длиной волны  $\lambda$ . По обе стороны от пластинки находит одна и та же среда с показателем преломления  $n_1$  ( $n_2 > n_1$ ).



Падающая волна частично отражается от верхней поверхности пластинки (луч 1') и частично преломляется (луч АД). Преломленная волна, достигнув нижней поверхности пластинки, также частично отражается (луч DC), а частично преломляется (луч 2'). То же самое вновь происходит на верхней поверхности пластинки с волной, распространяющейся вдоль луча DC, причем преломленная волна (луч 1'') накладывается на волну, непосредственно отраженную от верхней поверхности (луч 1'). Если на пути отраженных лучей 1' и 1'' поставить линзу, то эти лучи соберутся в одной из точек экрана, расположенного в фокальной плоскости линзы. Освещенность этой точки будет определяться оптической разностью хода лучей 1' и 1'' (отраженные лучи являются когерентными, так как образованы падающей волной 1). Найдем оптическую разность хода между этими лучами:

$$\Delta = L_2 - L_1,$$

где  $L_1$  — оптическая длина пути луча 1';  
 $L_2$  — оптическая длина пути луча 1''.

$$L_1 = n_1 \cdot AB + \frac{\lambda}{2}.$$

! Величина  $\frac{\lambda}{2}$  представляет собой добавочную разность хода, возникающую при отражении луча 1' от оптически более плотной среды.

$$L_2 = n_2 \cdot (AD + DC) = 2n_2 \cdot AD.$$

$$\Delta = L_2 - L_1 = 2n_2 \cdot AD - n_1 \cdot AB - \frac{\lambda}{2}.$$

Из треугольников AMD и ABC следует:

$$AD = \frac{d}{\cos \beta} \text{ и } AB = AC \sin \alpha = 2AM \sin \alpha = 2d \cdot \operatorname{tg} \beta \sin \alpha.$$

$$\Delta = L_2 - L_1 = 2n_2 \cdot \frac{d}{\cos \beta} - n_1 \cdot 2d \cdot \operatorname{tg} \beta \sin \alpha - \frac{\lambda}{2}$$

$$\Delta = L_2 - L_1 = \frac{2d}{\cos \beta} (n_2 - n_1 \cdot \sin \beta \sin \alpha) - \frac{\lambda}{2}$$

Из закона преломления для луча 1 следует

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow \sin \alpha = \frac{n_2}{n_1} \sin \beta.$$

С учетом закона преломления получим

$$\Delta = \frac{2d}{\cos \beta} (n_2 - n_2 \cdot \sin^2 \beta) - \frac{\lambda}{2} = \frac{2dn_2}{\cos \beta} \cos^2 \beta - \frac{\lambda}{2} = 2dn_2 \cos \beta - \frac{\lambda}{2}.$$

Так как

$$\cos \beta = \sqrt{1 - \sin^2 \beta} = \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \alpha\right)^2} = \frac{1}{n_2} \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \alpha},$$

то

$$\Delta = 2dn_2 \cos \beta - \frac{\lambda}{2} = 2d \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \alpha} - \frac{\lambda}{2}.$$



## ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

Интерференция в тонких пленках  
(продолжение)

Если  $n_1 = 1$  (например, воздух), то оптическая разность хода будет равна

$$\Delta = 2d\sqrt{n_2^2 - \sin^2 \alpha} - \frac{\lambda}{2}.$$

Если  $\Delta = 2m \frac{\lambda}{2}$  (условие максимумов), то при отражении будет наблюдаться усиление интенсивности света. Толщина пленки при этом будет равна

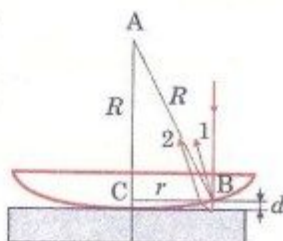
$$2m \frac{\lambda}{2} = 2d\sqrt{n_2^2 - \sin^2 \alpha} - \frac{\lambda}{2} \Rightarrow d = \frac{(2m+1)\lambda}{4\sqrt{n_2^2 - \sin^2 \alpha}}.$$

Если  $\Delta = (2m-1) \frac{\lambda}{2}$  (условие минимумов), то при отражении света будет наблюдаться ослабление интенсивности света. Толщина пленки при этом будет равна

$$(2m-1) \frac{\lambda}{2} = 2d\sqrt{n_2^2 - \sin^2 \alpha} - \frac{\lambda}{2} \Rightarrow d = \frac{m\lambda}{2\sqrt{n_2^2 - \sin^2 \alpha}}.$$

## Кольца Ньютона

Примером интерференции в тонких пленках являются кольца Ньютона, которые наблюдаются при отражении света от пленки, находящейся между плоскопараллельной пластинкой и соприкасающейся с ней плосковыпуклой линзой с большим радиусом кривизны.



визны. При освещении монохроматическим светом установки получается система темных и светлых полос. Найдем радиус колец Ньютона в **отраженном свете**.

Выразим радиус кольца Ньютона из треугольника ABC:

$$R^2 = (R-d)^2 + r^2 \Rightarrow R^2 = R^2 - 2Rd + d^2 + r^2 \Rightarrow r^2 = 2Rd \Rightarrow r = \sqrt{2Rd}.$$

! Так как величина  $d^2$  очень мала, то ею можно пренебречь.

Найдем оптическую разность хода между 1 и 2 лучами:

$$\Delta = L_2 - L_1 = 2n \cdot d + \frac{\lambda}{2} - 0 = 2n \cdot d + \frac{\lambda}{2},$$

где  $n$  – абсолютный показатель преломления среды, находящейся между линзой и плоскопараллельной пластинкой.

Так как для светлых колец выполняется условие максимумов

$$\Delta = 2m \frac{\lambda}{2} \Rightarrow 2n \cdot d + \frac{\lambda}{2} = 2m \frac{\lambda}{2} \Rightarrow d = \frac{(2m-1)\lambda}{4n},$$

то радиус светлых колец Ньютона будет равен

$$r = \sqrt{2Rd} \Rightarrow r = \sqrt{\frac{(2m-1)R\lambda}{2n}}.$$

Так как для темных колец выполняется условие минимумов

$$\Delta = (2m+1) \frac{\lambda}{2} \Rightarrow 2n \cdot d + \frac{\lambda}{2} = (2m+1) \frac{\lambda}{2} \Rightarrow d = \frac{m\lambda}{2n},$$

то радиус темных колец Ньютона будет равен

$$r = \sqrt{2Rd} \Rightarrow r = \sqrt{\frac{mR\lambda}{n}}.$$

! Интерференцию можно наблюдать и в **проходящем свете**, причем в данном случае не происходит потери волны. Поэтому радиусы темных колец Ньютона в отраженном свете соответствуют радиусам светлых колец Ньютона в проходящем свете, а радиусы светлых колец Ньютона в отраженном свете соответствуют радиусам темных колец Ньютона в проходящем свете.

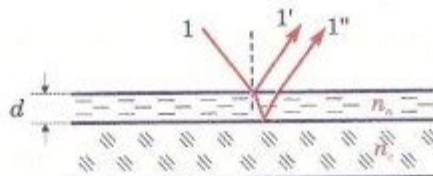


## Просветление оптики

Явление интерференции света находит широкое применение на практике. В частности, это явление используется при «просветлении оптики».

Отполированная поверхность стекол отражает около 4% падающего на нее света. Современные оптические приборы состоят из большого числа оптических стекол, линз, призм и т.д. Поэтому общие потери света в объективе фотоаппарата составляют около 25%, в микроскопе — 50% и т.д. В результате освещенность изображения получается малой и ухудшается также качество изображения.

Для уменьшения световых потерь на поверхность стеклянной детали наносят тонкую пленку с показателем преломления  $n_n$  меньшим, чем показатель преломления  $n_c$  стекла. При отражении света от границ раздела воздух-пленка и пленка-стекло возникает интерференция когерентных лучей 1' и 1".



Толщину пленки  $d$  и ее показатель преломления  $n_n$  подбирают так, чтобы интерферирующие лучи гасили друг друга (т.е. наблюдалось условие минимума интенсивности света). Найдем минимальную толщину пленки, при которой наблюдается ослабление интенсивности света. Для этого найдем оптическую разность хода между лучами 1' и 1":

$$\Delta = L_2 - L_1,$$

где  $L_1$  — оптическая длина пути луча 1';  
 $L_2$  — оптическая длина пути луча 1".

$$L_1 = \frac{\lambda}{2};$$

$$L_2 = 2dn_n + \frac{\lambda}{2}.$$

! Величина  $\frac{\lambda}{2}$  представляет собой добавочную разность хода, возникающую при отражении лучей 1 и 2 от оптически более плотной среды.

$$\Delta = L_2 - L_1 = 2dn_n + \frac{\lambda}{2} - \frac{\lambda}{2} = 2dn_n.$$

Чтобы наблюдалось ослабление интенсивности отраженного света, необходимо выполнение условия  $\Delta = (2m-1)\frac{\lambda}{2}$ .

Найдем толщину пленки:

$$\Delta = 2dn_n = (2m-1)\frac{\lambda}{2} \Rightarrow d = \frac{(2m-1)\lambda}{4n_n}.$$

Чтобы пленка была минимальной толщины, должно быть  $m = 1$ .

Получаем

$$d = \frac{\lambda}{4n_n},$$

где  $\lambda$  — длина световой волны;

$n_n$  — абсолютный показатель преломления пленки.

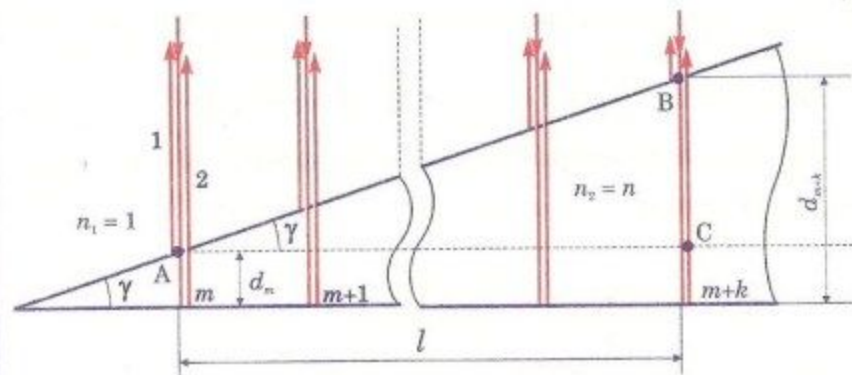


## ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

## Интерференция в клиновидной пленке

Клин с углом  $\gamma$ , изготовленный с материала с абсолютным показателем преломления  $n$ , освещается параллельным пучком света с длиной волны  $\lambda$ .

Параллельный пучок лучей, падая нормально к грани клина, отражается как от верхней, так и от нижней грани. Эти лучи когерентны, и поэтому наблюдается устойчивая картина интерференции. Так как интерференционные полосы наблюдаются только при малых углах клина, то отраженные лучи 1 и 2 оказываются практически параллельными.



Найдем оптическую разность хода лучей 1 и 2 в точке A клина:

$$\Delta = L_2 - L_1 = 2d_m n - \frac{\lambda}{2},$$

где  $L_2 = 2d_m n$  и  $L_1 = 0 + \frac{\lambda}{2}$  — оптические длины пути для второго и первого лучей соответственно;

$d_m$  — толщина клина в точке A, соответствующей темной полосе с номером  $m$ .

Темные полосы видны на тех участках клина, для которых разность хода лучей кратна нечетному числу полуволин:

$$\Delta = (2m-1)\lambda/2, \quad m = 1, 2, \dots$$

Светлые полосы видны на тех участках клина, для которых разность хода лучей кратна четному числу полуволин:

$$\Delta = 2m\lambda/2, \quad m = 1, 2, \dots$$

Подставляя условия максимумов и минимумов в выражение для разности  $\Delta$ , получим толщину пленки в том месте, где наблюдаются темные полосы:

$$2d_m n - \frac{\lambda}{2} = (2m-1)\frac{\lambda}{2} \Rightarrow d_m = \frac{m\lambda}{2n}$$

и где наблюдаются светлые полосы

$$2d_m n - \frac{\lambda}{2} = 2m\frac{\lambda}{2} \Rightarrow d_m = \frac{(2m+1)\lambda}{4n}$$

Если  $k$  темных полос укладывается на расстоянии  $l$ , то из треугольника ABC следует, что

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{d_{m+k} - d_m}{l}.$$

Если подставить  $d_m$  и  $d_{m+k}$ , то получим

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{\frac{m+k}{2n}\lambda - \frac{m}{2n}\lambda}{l} = \frac{k\lambda}{2nl}.$$

Аналогичное выражение получается и для светлых полос. Число полос, приходящихся на длину клина  $l$ , равно

$$k = \frac{2\operatorname{tg} \gamma \cdot nl}{\lambda}.$$



## ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

## Дифракция света

**Дифракция света** — огибание световыми волнами препятствий и захождение в область геометрической тени.

! Дифракция света наблюдается лишь в том случае, если размеры препятствий сравнимы с длиной световой волны.

**Принцип Гюйгенса:** каждый элемент поверхности, которой достигла в данный момент волна, является источником вторичных элементарных волн, распространяющихся в первоначальном направлении со скоростью исходной волны. Огибающая элементарных волн совпадает с новым положением волнового фронта в следующий момент времени.



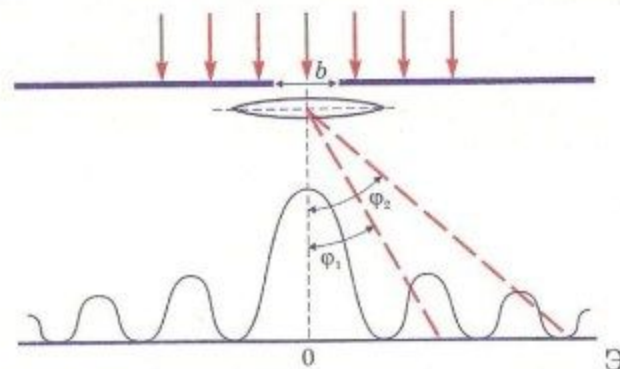
**Принцип Гюйгенса-Френеля:** все вторичные источники, расположенные на поверхности фронта волны, когерентны между собой. Амплитуда и фаза волны в любой точке пространства — это результат интерференции волн, излучаемых вторичными источниками.

! Дифракция есть интерференция вторичных волн.

## Дифракция света на узкой щели

Пусть плоская монохроматическая световая волна падает нормально плоскости узкой щели шириной  $b$ . За щелью помещают собирающую линзу, в фокальной плоскости которой находится экран.

Положения минимумов и максимумов освещенности на экране определяются углом  $\varphi$ , отсчитанным от нормали к плоскости щели.



$$b \cdot \sin \varphi = \pm m \lambda \quad \text{— условие минимумов;}$$

$$b \cdot \sin \varphi = \pm (2m + 1) \frac{\lambda}{2} \quad \text{— условие максимумов,}$$

где  $b$  — ширина щели;

$m$  — порядок минимума (максимума) ( $m = 1, 2, 3, \dots$ );

$\lambda$  — длина световой волны.

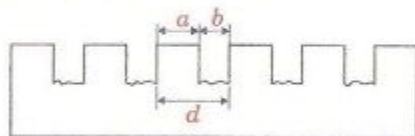


## ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

Дифракция света  
на дифракционной решетке

**Дифракционная решетка** — это оптическое устройство, представляющее собой совокупность большого числа параллельных щелей (штрихов) равной ширины, лежащих в одной плоскости и разделенных равными по ширине непрозрачными промежутками.

Дифракционную решетку можно получить нанесением царапин (штрихов) на стеклянную пластинку. Непроцарапанные места (щели) будут пропускать свет; штрихи, соответствующие промежутку между щелями, рассеивают свет и не пропускают его.



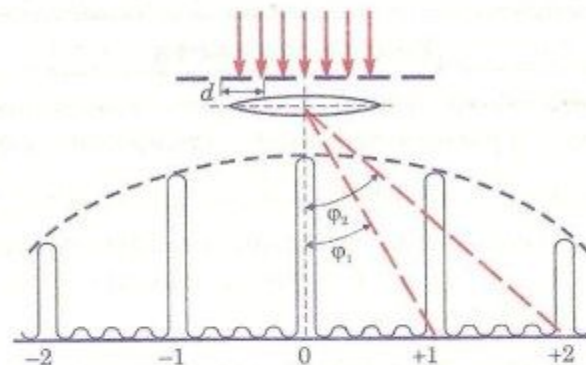
Суммарную ширину щели  $b$  и промежутка  $a$  между щелями называют **периодом** (или **постоянной**) **дифракционной решетки**  $d$ :

$$d = a + b$$

Период дифракционной решетки можно выразить через **число штрихов на единицу длины решетки**:

$$d = \frac{1}{N}$$

где  $N$  — число штрихов решетки на единицу длины решетки.



При **нормальном** падении **монохроматического** света на дифракционную решетку положение **главных максимумов** определяется формулой

$$d \sin \varphi = \pm m \lambda$$

где  $d$  — период дифракционной решетки;

$\varphi$  — угол между нормалью к поверхности решетки и направлением наблюдения максимумов (угол дифракции);

$m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$  — порядок главных максимумов;

$\lambda$  — длина волны света.

! Если на дифракционную решетку падает белый свет, то в результате дифракции на решетке каждый главный максимум (кроме центрального) разлагается в спектр. Следовательно, дифракционная решетка является спектральным прибором (аналогично трехгранной стеклянной призме).

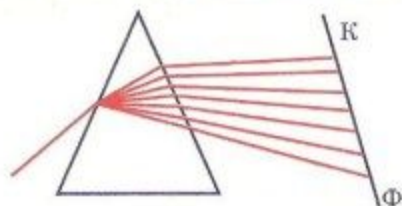


## ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

## Дисперсия света

**Дисперсия света** — явление, обусловленное зависимостью скорости  $v$  распространения световых волн в веществе от длины волны (частоты). Так как  $n = \frac{c}{v}$ , то дисперсию света можно определить как зависимость показателя преломления вещества  $n$  от длины  $\lambda$  волны световых волн ( $n = n(\lambda)$ ) или от частоты  $\nu$  ( $n = n(\nu)$ ).

Следствием дисперсии является разложение белого света при прохождении его через призму на составляющие с различными длинами волн (**призматический спектр света**).



! С помощью призмы, как и с помощью дифракционной решетки, можно получить спектр света.

В дисперсионном и дифракционном спектрах имеются различия:

- дисперсионный спектр не равномерный, он сжат в красной области и растянут в фиолетовой; дифракционный спектр равномерно растянут во всех областях;
- в дисперсионном спектре большее отклонение от первоначального направления испытывают фиолетовые лучи, в дифракционном — красные;
- в дифракционном спектре наблюдается несколько порядков спектра, в дисперсионном — один спектр.

## КВАНТОВЫЕ СВОЙСТВА СВЕТА

## Квантовая природа излучения

При объяснении механизма излучения нагретого тела М. Планк предположил, что атомы излучают электромагнитные волны не непрерывно, а прерывисто, т.е. порциями — квантами, энергия  $\epsilon$  которых пропорциональна частоте  $\nu$  колебаний:

$$\epsilon = h\nu$$

где  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж · с — постоянная Планка.

Идея Планка в дальнейшем была развита А. Эйнштейном, который предположил, что электромагнитное излучение не только испускается порциями (квантами), но распространяется и поглощается веществом в виде отдельных частиц электромагнитного поля — **фотонов**.

Фотон обладает:

энергией  $\epsilon_{\phi} = h\nu = h \frac{c}{\lambda}$  ;

массой  $m_{\phi} = \frac{\epsilon}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{h}{c\lambda}$  ;

импульсом  $p_{\phi} = mc = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$  .

Представление о фотонах как квантах электромагнитного поля нашло свое подтверждение и дальнейшее развитие в ряде других явлений: **фотоэлектрическом эффекте, давлении света, химическом действии света, эффекте Комптона** и т.д.

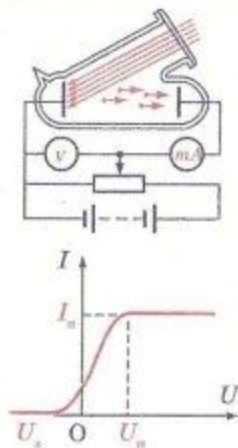


# КВАНТОВЫЕ СВОЙСТВА СВЕТА

## Внешний фотоэффект. Опыты Столетова

**Внешний фотоэффект** — это явление испускания электронов поверхностью веществ под действием электромагнитного излучения. Вылетевшие электроны называют **фотоэлектронами**.

Внешний фотоэффект был детально исследован русским физиком А. Столетовым. Для исследования Столетов использовал установку, изображенную на рисунке. В стеклянном баллоне, из которого был выкачан воздух, находилось два электрода. В баллон через «окошко» падает свет на поверхность — катод К. Подаваемое на электроды напряжение изменялось с помощью потенциометра и измерялось вольтметром  $V$ . Под действием света катод испускал электроны, которые замыкали цепь между электродами, и миллиамперметр показывал наличие тока в цепи. Снимая показания миллиамперметра и вольтметра, можно построить **вольт-амперную характеристику** межэлектродного промежутка.

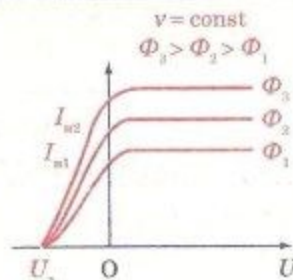


Из вольт-амперной характеристики следует, что:

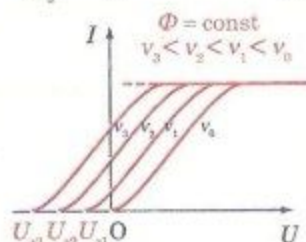
- 1) при некотором напряжении  $U_n$  фототок уже не зависит от напряжения, т.е. достигает насыщения ( $I_n$ ). **Явление насыщения** соответствует случаю, когда все электроны, покинувшие катод, достигают анода;
- 2) при некотором задерживающем напряжении  $U_s$  фототок становится равным нулю. В этом случае работа электрического поля равна изменению кинетической энергии фотоэлектронов:

$$eU_s = A = \frac{mv_{\max}^2}{2}.$$

Из вольт-амперной характеристики, полученной при постоянной частоте света и различных световых потоках, следует, что с увеличением светового потока  $\Phi$  сила тока насыщения возрастает.



Из вольт-амперной характеристики, полученной при постоянном световом потоке и различных частотах света, следует, что с увеличением частоты света величина задерживающего напряжения (максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов) увеличивается.



На основе опытов А. Столетов установил **три закона внешнего фотоэффекта**:

- 1) максимальное число фотоэлектронов  $n$ , которые вырываются с катода за единицу времени, пропорционально интенсивности падающего излучения.
- ! Максимальное число фотоэлектронов, которые вырываются с катода за единицу времени, называют **фототоком насыщения**;
- 2) максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно возрастает с увеличением частоты падающего излучения и не зависит от его интенсивности;
- 3) для каждого вещества существует красная граница фотоэффекта, т.е. минимальная частота  $\nu_0$  или максимальная длина волны  $\lambda_{\text{кр}}$  излучения, за которой внешний фотоэффект не наблюдается.

! Значение красной границы фотоэффекта зависит от химической природы вещества и состояния его поверхности.



## КВАНТОВЫЕ СВОЙСТВА СВЕТА

### Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта

Явление внешнего фотоэффекта Эйнштейн объяснил исходя из представления о фотонах и **уравнения**, которое удовлетворяет **закону сохранения энергии** для системы фотон–электрон.

Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mv_{\text{max}}^2}{2},$$

где  $A_{\text{вых}}$  — **работа выхода** электрона из вещества;  
 $v_{\text{max}}$  — максимальная скорость фотоэлектронов.

! Работа выхода электрона  $A_{\text{вых}}$  — это минимальная энергия, которую нужно сообщить электрону, чтобы он покинул вещество.

Исходя из этого уравнения, можно объяснить основные закономерности внешнего фотоэффекта:

— так как каждый электрон испускается в результате поглощения одного фотона, то общее число фотоэлектронов за единицу времени пропорционально числу фотонов, падающих за то же время на поверхность вещества. Следовательно, число  $n$  фотонов пропорционально потоку  $\Phi$  излучения ( $n = \Phi/h\nu$ );

— поскольку для каждого вещества работа  $A_{\text{вых}}$  имеет определенное значение, то максимальная кинетическая энергия испускаемых фотоэлектронов определяется только частотой излучения и не зависит от интенсивности света ( $\frac{mv_{\text{max}}^2}{2} = h\nu - A_{\text{вых}}$ );

— внешний фотоэффект возможен в случае, когда

$$h\nu \geq A_{\text{вых}}.$$

Тогда **красная граница фотоэффекта** определяется из соотношения

$$h\nu_0 = A_{\text{вых}} \Rightarrow \nu_0 = \frac{A_{\text{вых}}}{h};$$

$$\lambda_{\text{кр}} = \frac{c}{\nu_0} = \frac{ch}{A_{\text{вых}}}.$$

! Частота  $\nu_0$  и длина волны  $\lambda_{\text{кр}}$ , которые соответствуют красной границе фотоэффекта, зависят только от величины работы выхода, т.е. от химической природы вещества и состояния его поверхности.

### Давление света

Наличие у фотона импульса экспериментально проявляется в том, что свет оказывает **давление** на твердые тела и газы.

Если на поверхность тела падает пучок свет частотой  $\nu$ , то **давление  $p$  света** будет равно

$$p = nh\nu(1 + \rho) = w(1 + \rho) = \frac{E_s}{c}(1 + \rho),$$

где  $n$  — концентрация электронов в пучке падающего излучения;

$w$  — энергия фотонов в единице объема;

$E_s$  — энергия падающего излучения на единицу площади в единицу времени;

$\rho$  — коэффициент отражения поверхности.

! Если поверхность зеркальная, то  $\rho = 1$ , если поверхность зачерненная, то  $\rho = 0$ .



## КВАНТОВЫЕ СВОЙСТВА СВЕТА

### Корпускулярно-волновой дуализм

Свет имеет двойственную природу: в одних экспериментах свет проявляет себя как поток частиц (фотонов), в других — как электромагнитная волна. Двойственная природа света нашла свое отражение в **принципе дополнительности**, который был сформулирован Н. Бором.

Согласно принципу дополнительности корпускулярные и волновые свойства света дополняют друг друга и только вместе дают полное понимание того, что представляет собой свет. Двойственная природа света получила название **корпускулярно-волнового дуализма** и явилась исходным пунктом для становления квантовой механики.

**! Принцип дополнительности является фундаментальным принципом квантовой механики, поскольку позволяет понять процессы, которые происходят в микромире.**

### Гипотеза де Бройля

Физик Луи де Бройль, опираясь на представления о симметрии свойств в природе, высказал гипотезу о том, что поскольку свет ведет себя в одних случаях как волна, а в других как квазичастица, то и материальные частицы должны обладать волновыми свойствами.

Де Бройль предположил, что каждой частице, обладающей импульсом  $p$ , должна соответствовать длина волны  $\lambda$ , связанная с модулем импульса  $p$  тем же соотношением, что и для фотона.

Дебройлевская длина волны частицы равна

$$\lambda_{\text{бр}} = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

## ЭЛЕМЕНТЫ АТОМНОЙ ФИЗИКИ



## ЭЛЕМЕНТЫ АТОМНОЙ ФИЗИКИ

## Спектр атома водорода

Спектр атома водорода состоит из отдельных линий (**линейчатый спектр**), которые объединены в группы, называемые **сериями**. Длина волны и частота любой спектральной линии в каждой серии спектра водорода определяется **формулой Бальмера**, полученной экспериментально:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right); \quad v = \frac{c}{\lambda} = Rc \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right),$$

где  $R = 1,097 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$  — постоянная Ридберга;

$c$  — скорость света в вакууме;  $n$  и  $k$  — целые числа.

Линии, длина (частота) которых определяется одним и тем же значением  $n$ , но разными  $k$ , принадлежат к одной серии (для серии Лаймана  $n = 1$ , Бальмера — 2, Пашена — 3, Брэкетта — 4, Пфунда — 5, Хемфри — 6). Для каждой серии  $k = n + 1, n + 2, n + 3$  и т.д.

Линия, соответствующая  $k = n + 1$ , называется **головной линией серии**, а линия, соответствующая  $n = \infty$ , называется **границей серии**.

Все линии серии Лаймана и часть линий серии Бальмера расположены в ультрафиолетовой области ( $\lambda < 400 \text{ нм}$ ), некоторые линии серии Бальмера расположены в видимой области спектра ( $\lambda = 400\text{--}760 \text{ нм}$ ), а линии остальных серий — в инфракрасной области спектра ( $\lambda > 760 \text{ нм}$ ).

## Строение атома

Опыты Резерфорда по рассеянию альфа-частиц позволили построить **ядерную модель** атома, согласно которой атом представляет систему частиц, в центре которой нахо-

дится положительно заряженное ядро с зарядом  $+Z \cdot e$ , а вокруг ядра движется  $Z$  электронов ( $Z$  — порядковый номер элемента в таблице Менделеева,  $e$  — элементарный заряд). Линейные размеры ядра порядка  $10^{-15}$  —  $10^{-14} \text{ м}$ , а размеры атома —  $10^{-10} \text{ м}$ .

! Ядерная модель атома Резерфорда оказалась в противоречии с классической физикой. Чтобы выйти из этого затруднения, Н. Бор сформулировал два постулата.

## Постулаты Бора

**Первый постулат:** атом может находиться только в особых стационарных состояниях, каждому из которых соответствует определенное значение энергии  $E_n$  ( $n$  — номер состояния); в стационарном состоянии атом не излучает электромагнитные волны. Для электронных орбит в стационарном состоянии справедливо соотношение

$$m_e v_n r_n = n \frac{h}{2\pi},$$

где  $m_e$  — масса электрона;  $v_n$  — скорость электрона на стационарной орбите радиусом  $r_n$ ;  $n = 1, 2, 3, \dots$  — номер стационарной орбиты;  $h$  — постоянная Планка.

**Второй постулат:** излучение света происходит при переходе атома из стационарного состояния с большей энергией  $E_k$  в стационарное состояние с меньшей энергией  $E_n$ . Энергия излученного фотона равна разности энергий стационарных состояний:

$$h\nu_{kn} = E_k - E_n \Rightarrow \nu_{kn} = \frac{(E_k - E_n)}{h}.$$

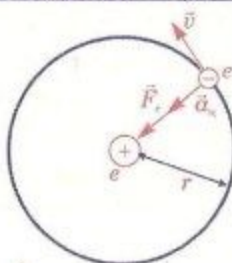
! Теория Бора, прекрасно объяснив частоты линий в спектре водорода, не смогла объяснить их интенсивностей. Поэтому она явилась переходным этапом на пути к созданию квантово-механической теории атомных явлений.



# ЭЛЕМЕНТЫ АТОМНОЙ ФИЗИКИ

## Теория Бора для атома водорода

Рассмотрим атом водорода. Атом водорода содержит ядро, вокруг которого движется один электрон. Центробежное ускорение электрону сообщает сила кулоновского притяжения. Из второго закона Ньютона следует:



$$m_e a_n = F \Rightarrow m_e \frac{v_n^2}{r_n} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r_n^2}$$

Согласно теории Бора для стационарных орбит справедливо соотношение

$$m_e v_n r_n = n \frac{h}{2\pi}$$

Решая данную систему уравнений, можно найти **скорость электрона на стационарной орбите с номером  $n$** :

$$\left. \begin{aligned} m_e \frac{v_n^2}{r_n} &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r_n^2} \\ m_e v_n r_n &= n \frac{h}{2\pi} \end{aligned} \right\} \Rightarrow v_n = \frac{e^2}{2\epsilon_0 h} \cdot \frac{1}{n}$$

Тогда радиус орбиты с номером  $n$  будет равен

$$r_n = \frac{hn}{2\pi m_e v} = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m_e e^2} n^2 = a_0 n^2$$

где  $a_0 = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m_e e^2} = 0,529 \cdot 10^{-10} \text{ м}$  — радиус первой боровской орбиты.

## Кинетическая энергия электрона

$$K_n = \frac{m_e v_n^2}{2} = \frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \cdot \frac{1}{n^2}$$

Потенциальная энергия взаимодействия электрона с ядром

$$П_n = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r_n} = -\frac{m_e e^4}{4\epsilon_0^2 h^2} \cdot \frac{1}{n^2}$$

Полная энергия атома водорода будет равна

$$E_n = K_n + П_n = \frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \cdot \frac{1}{n^2} - \frac{m_e e^4}{4\epsilon_0^2 h^2} \cdot \frac{1}{n^2} = -\frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \cdot \frac{1}{n^2}$$

Энергия атома водорода определяется номером орбиты  $n$ . Величина  $n$  получила название **главного квантового числа**.

Энергия атома водорода в основном состоянии ( $n = 1$ ) равна  $E_1 = -13,55 \text{ эВ}$ . В первом возбужденном состоянии ( $n = 2$ ) —  $E_2 = -3,38 \text{ эВ}$ , во втором возбужденном состоянии ( $n = 3$ ) —  $E_3 = -1,51 \text{ эВ}$  и т.д.

Полную энергию атома водорода можно представить в виде

$$E_n = -13,55 \cdot \frac{1}{n^2} \text{ (эВ)}$$

Согласно второму постулату Бора частота излученного фотона при переходе атома из стационарного состояния с энергией  $E_k$  в стационарное состояние с меньшей энергией  $E_n$  равна

$$\begin{aligned} \nu_{kn} &= \frac{(E_k - E_n)}{h} = \left( -\frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \cdot \frac{1}{k^2} + \frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \cdot \frac{1}{n^2} \right) = \\ &= \frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right) = R c \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right) \end{aligned}$$

где  $R = \frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^2 c} = 1,097 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$  — постоянная Ридберга.



## ЭЛЕМЕНТЫ АТОМНОЙ ФИЗИКИ

## Теория Бора для атома водорода (продолжение)

Энергию излученного фотона (в эВ) можно определить по формуле

$$E = E_k - E_n = 13,55 \cdot \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right) \text{ эВ}.$$

На рисунке приведена схема уровней атома водорода и тех переходов, в результате которых в спектре атомарного водорода появляются линии, принадлежащие к сериям Лаймана, Бальмера и Пашена.



Слева указаны соответствующие значения главного квантового числа  $n$ . Энергетическое состояние, которому соответствует наименьшее значение энергии атома  $n=1$ , называется **основным состоянием**, а остальные — **возбужденными**. Значению  $n=\infty$  соответствует состояние, в котором электрон бесконечно удален от ядра и не связан с последним. Поэтому изменение энергии при переходе атома из состояния  $n=1$  в состояние  $n=\infty$  называют энергией ионизации атома. **Энергия ионизации** — это энергия, которую нужно затратить для того, чтобы электрон, находящийся в основном состоянии, удалить из атома, для водорода определяется по формуле

$$E_i = h\nu_{1,\infty} = Rch = 13,55 \text{ эВ}.$$

# МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА



## МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

### Основные положения молекулярно-кинетической теории

1. Любое тело состоит из большого количества весьма малых обособленных частиц — молекул, атомов, ионов.
2. Эти частицы находятся в беспорядочном, хаотическом движении.
3. Все частицы взаимодействуют между собой силами притяжения и отталкивания.

### Идеальный газ

**Идеальный газ** — это модель реального газа, в которой не учитываются объем молекул и силы взаимодействия между ними.

! Реальные газы при низких давлениях (мало превышающих атмосферное давление) и достаточно высоких температурах близки по своим свойствам к идеальному газу.

### Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа

Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа

$$p = \frac{1}{3} n m_0 v_{\text{кв}}^2 = \frac{2}{3} n \bar{E}_k = \frac{2E_k}{3V},$$

где  $n = \frac{N}{V}$  — концентрация молекул (число молекул в единице объема);

$m_0$  — масса одной молекулы газа;

$v_{\text{кв}}$  — **средняя квадратичная скорость** хаотического поступательного движения одной молекулы;

$\bar{E}_k = \frac{m_0 v_{\text{кв}}^2}{2}$  — **средняя кинетическая энергия** хаотического поступательного движения одной молекулы;

$E_k$  — кинетическая энергия хаотического поступательного движения **всех** молекул газа.

! Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа связывает между собой макроскопические параметры газа (давление) и микроскопические (средняя кинетическая энергия поступательного движения молекулы).

### Уравнение Клапейрона–Менделеева

Уравнение Клапейрона–Менделеева:

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

где  $\nu = \frac{m}{M} = \frac{N}{N_A}$  — количество вещества (число молей газа);

$m$  — масса газа;

$M$  — молярная масса;

$N$  — число молекул газа.

! Уравнение Клапейрона–Менделеева связывает параметры состояния газа (массу, давление, объем и температуру) и поэтому называется **уравнением состояния идеального газа**.

Из уравнения Клапейрона–Менделеева следует, что плотность идеального газа равна

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



## МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

### Абсолютная температура

**Абсолютная температура  $T$**  — это мера средней кинетической энергии движения молекул (атомов) изолированной системы в условиях ее термодинамического равновесия.

Средняя квадратичная скорость молекул идеального газа

$$v_{\text{кв}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}},$$

где  $k = \frac{R}{N_A} = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К — постоянная Больцмана;

$R = 8,31$  Дж/(моль · К) — универсальная газовая постоянная;

$N_A = 6,62 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup> — постоянная Авогадро;

$m_0 = \frac{M}{N_A}$  — масса одной молекулы газа;

$M$  — молярная масса газа;

$T$  — абсолютная температура газа.

Средняя кинетическая энергия хаотического поступательного движения молекулы идеального газа

$$\bar{E}_k = \frac{m_0 v_{\text{кв}}^2}{2} = \frac{3}{2} kT.$$

! Абсолютная температура  $T$  (температура по шкале Кельвина) связана с температурой по шкале Цельсия следующим соотношением:

$$T = (t + 273) \text{ К},$$

где  $t$  — температура по шкале Цельсия.

Из основного уравнения молекулярно-кинетической теории идеального газа ( $p = \frac{2}{3} n \bar{E}_k$ ) и выражения для средней кинетической энергии молекул идеального газа ( $\bar{E}_k = \frac{3}{2} kT$ ) можно получить уравнение для давления в виде

$$p = nkT.$$

### Уравнение Клапейрона

Если масса идеального газа не изменяется ( $m = \text{const}$ ), то для любых двух равновесных состояний газа выполняется уравнение Клапейрона

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} = \text{const}.$$

### Закон Дальтона

**Закон Дальтона:** давление  $p$  газовой смеси в состоянии равновесия равно сумме парциальных давлений  $p_i$  газов, образующих эту смесь:

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

**Парциальное давление** — это давление газа, если бы он один занимал весь объем.



# МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

## Изопроцессы

Процессы в газе постоянной массы ( $m = \text{const}$ ), при которых один из трех параметров ( $p$ ,  $V$  или  $T$ ) остается неизменным, называют **изопроцессами**.

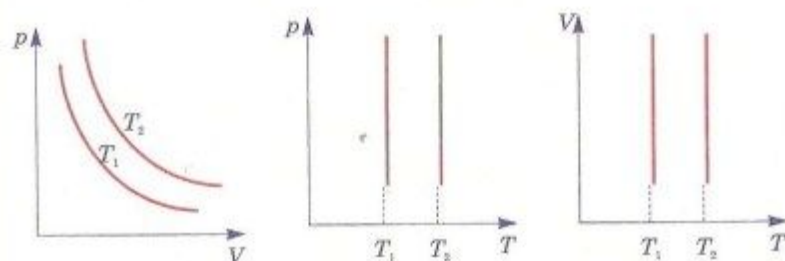
Уравнения, описывающие эти процессы, могут быть получены из уравнения Клапейрона или Клапейрона-Менделеева, хотя исторически они были получены экспериментально.

**Изотермический процесс** ( $T = \text{const}$ ,  $m = \text{const}$ ):

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} = \text{const} \Rightarrow p_1 V_1 = p_2 V_2 = \text{const}$$

или

$$pV = \text{const} \quad \text{— закон Бойля-Мариотта.}$$



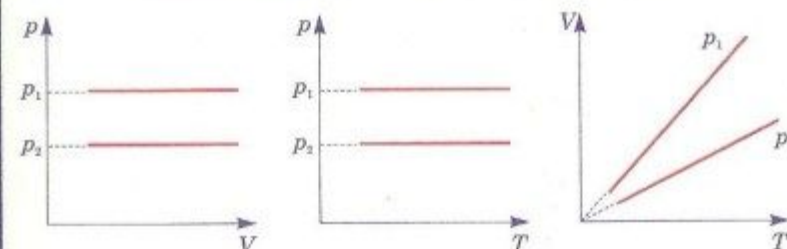
Изотермы ( $T_1 < T_2$ )

**Изобарный процесс** ( $p = \text{const}$ ,  $m = \text{const}$ ):

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} = \text{const} \Rightarrow \frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} = \text{const}$$

или

$$\frac{V}{T} = \text{const} \quad \text{— закон Гей-Люссака.}$$



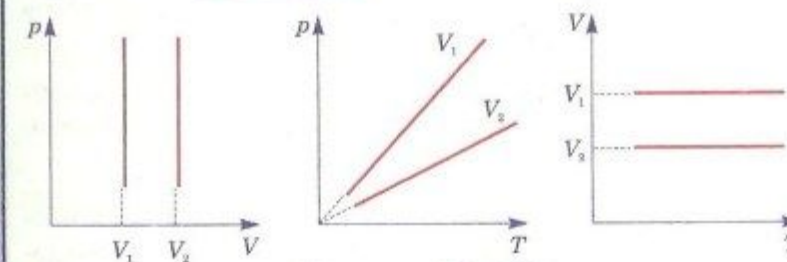
Изобары ( $p_1 < p_2$ )

**Изохорный процесс** ( $V = \text{const}$ ,  $m = \text{const}$ ):

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} = \text{const} \Rightarrow \frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} = \text{const}$$

или

$$\frac{p}{T} = \text{const} \quad \text{— закон Шарля.}$$



Изохоры ( $V_1 < V_2$ )



## МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

### Влажность воздуха

**Абсолютной влажностью воздуха** называется величина, равная массе водяного пара, содержащегося в  $1 \text{ м}^3$  воздуха (**плотность водяного пара в воздухе**).

**Относительная влажность воздуха** — это отношение плотности водяного пара в воздухе (абсолютной влажности воздуха) к плотности насыщенных водяных паров при данной температуре:

$$\varphi = \frac{\rho}{\rho_0} \cdot 100\%$$

где  $\rho$  — абсолютная влажность при данной температуре;  
 $\rho_0$  — плотность **насыщенного** водяного пара при той же температуре.

**Насыщенный водяной пар** — это пар, находящийся в динамическом равновесии со своей жидкостью.

**Динамическое равновесие** между жидкостью и паром наступает тогда, когда число молекул, покидающих жидкость, равно числу молекул, возвращающихся в жидкость.

! Если число молекул, покидающих жидкость, больше числа молекул, возвращающихся в жидкость, то происходит **испарение**.

! Если число молекул, покидающих жидкость, меньше числа молекул, возвращающихся в жидкость, то происходит **конденсация**.

**Точка росы** — это температура  $t_p$ , при которой водяной пар, содержащийся в воздухе, становится насыщенным ( $\varphi = 100\%$ ).

! При охлаждении воздуха до точки росы начинается конденсация водяного пара.

Учитывая пропорциональную зависимость между плотностью  $\rho$  и давлением  $p$  ( $\rho = \frac{pM}{RT}$ ), относительную влажность воздуха можно определить по формуле

$$\varphi = \frac{p}{p_0} \cdot 100\%$$

где  $p$  — парциальное давление водяного пара, содержащегося в воздухе при данной температуре;

$p_0$  — давление насыщенного водяного пара при той же температуре.

**Парциальное давление водяного пара** — это давление, которое производил бы водяной пар, если бы все остальные газы отсутствовали.

! Точка росы характеризует влажность воздуха. Для определения точки росы водяных паров используют специальные приборы — **гигрометры**.

Зная температуру воздуха  $t$  и точку росы  $t_p$ , по таблицам находят плотность (давление) насыщенного водяного пара при этих температурах  $\rho_{n1}(p_{n1})$  и  $\rho_{n2}(p_{n2})$  и по формуле находят относительную влажность воздуха:

$$\varphi = \frac{\rho_{n2}}{\rho_{n1}} \cdot 100\% = \frac{p_{n2}}{p_{n1}} \cdot 100\%$$

где  $\rho_{n2}(p_{n2})$  — плотность (давление) насыщенного водяного пара при температуре, равной  $t_p$ ;

$\rho_{n1}(p_{n1})$  — плотность (давление) насыщенного водяного пара при температуре, равной  $t$ .



## МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

### Внутренняя энергия

**Внутренняя энергия системы  $U$**  равна кинетической энергии хаотического движения микрочастиц системы (молекул, атомов, электронов, ядер) и потенциальной энергии их взаимодействия.

В общем случае внутренняя энергия системы определяется ее параметрами: температурой  $T$  и объемом  $V$ . Изменение внутренней энергии тела (системы) может происходить в результате двух различных процессов: **теплообмена** и совершения **механической работы**.

Процесс передачи внутренней энергии от одного тела к другому без совершения работы называется **теплообменом**.

Количество энергии, передаваемое системе внешними телами при теплообмене, называют **количеством теплоты  $Q$** .

! Сообщение системе теплоты  $Q$  не связано с макроскопическими перемещениями тел системы. Изменение внутренней энергии при теплообмене состоит в том, что отдельные молекулы более нагретого тела в процессе столкновений передают часть своей кинетической энергии молекулам менее нагретого тела.

Существует три вида теплообмена: **теплопроводность**, **конвекция**, **излучение**.

**Теплопроводность** — это процесс теплообмена между телами при их непосредственном контакте, обусловленный хаотическим движением частиц тела.

**Конвекция** — это процесс переноса энергии, который осуществляется перемещением слоев жидкости и газа от места с более высокой температурой к месту с более низкой

температурой. Конвекция наблюдается только в жидкостях и газах.

**Излучение** — это перенос энергии от одного тела к другому (а также между частями одного и того же тела) путем обмена электромагнитным излучением, т.е. теплообмен, обусловленный процессами испускания, распространения, рассеяния и поглощения электромагнитных волн.

! Передача энергии излучением может осуществляться при отсутствии материальной среды, разделяющей поверхности теплообмена, т.е. в полном вакууме.

! Принято считать, что количество теплоты  $Q > 0$ , когда к системе подводится теплота. Если система отдает теплоту, то  $Q < 0$ . Работа считается  $A > 0$ , когда система совершает работу над внешними телами. Если работа совершается внешними телами над системой, то  $A' < 0$ .

### Первое начало термодинамики

**Первое начало термодинамики:** количество теплоты  $Q$ , полученное системой от окружающих тел, идет на изменение ее внутренней энергии  $\Delta U$  и на совершение ею работы  $A$  над внешними телами (силами):

$$Q = \Delta U + A$$

Первое начало термодинамики можно сформулировать так: изменение внутренней энергии системы  $\Delta U$  равно сумме сообщаемой ей количеству теплоты  $Q$  и работы  $A'$  ( $A' = -A$ ), произведенной над системой внешними силами:

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

! **Первый закон термодинамики** — это частный случай всеобщего закона сохранения и превращения энергии в применении к системам, в которых существенную роль играют тепловые процессы.



## МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

### Внутренняя энергия идеального газа

Внутренняя энергия идеального газа равна сумме кинетических энергий поступательного и вращательного движения всех молекул газа.

! Потенциальная энергия взаимодействия молекул идеального газа равна нулю, так как в идеальном газе отсутствуют силы взаимодействия.

Внутренняя энергия идеального газа равна

$$U = \frac{i}{2} \nu RT,$$

где  $i$  — число степеней свободы молекулы идеального газа.

Число степеней свободы  $i$  — это число независимых движений, в которых может участвовать молекула. С математической точки зрения число степеней свободы равно числу независимых параметров, необходимых для определения положения молекулы в пространстве.

Для молекулы одноатомного газа  $i = 3$ ,

$$U = \frac{3}{2} \nu RT.$$

Для молекулы двухатомного газа  $i = 5$ ,

$$U = \frac{5}{2} \nu RT.$$

Для молекул, состоящих из трех и более атомов,  $i = 6$ ,

$$U = \frac{6}{2} \nu RT.$$

Изменение внутренней энергии идеального газа равно

$$\Delta U = U_2 - U_1 = \frac{i}{2} \nu R(T_2 - T_1) = \frac{i}{2} \nu R \Delta T.$$

### Работа газа при изобарном процессе

Работа, совершаемая идеальным газом при изобарном расширении от объема  $V_1$  до объема  $V_2$ , определяется по формуле

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

Работу газа можно выразить через изменение температуры  $\Delta T$ :

$$A = p(V_2 - V_1) = pV_2 - pV_1 = \nu RT_2 - \nu RT_1 = \nu R \Delta T.$$

### Применение первого начала термодинамики к изопроцессам

1. При изотермическом процессе ( $T = \text{const}$ ) изменение температуры  $\Delta T = 0$ , поэтому изменение внутренней энергии газа  $\Delta U = 0$ . Тогда согласно первому началу термодинамики

$$Q = A.$$

! Подведенное количество теплоты при изотермическом процессе идет только на совершение работы газом над внешними телами.

2. При изохорном процессе ( $V = \text{const}$ ) изменение объема  $\Delta V = 0$ , поэтому работа  $A = 0$ . Тогда первое начало термодинамики примет вид

$$Q = \Delta U.$$

! Количество теплоты, сообщаемое газу, идет только на увеличение его внутренней энергии.

3. При изобарном процессе ( $p = \text{const}$ ) изменяется температура газа ( $\Delta T \neq 0$ ) и изменяется объем газа ( $\Delta V \neq 0$ ), поэтому изменение внутренней энергии газа  $\Delta U \neq 0$  и работа  $A \neq 0$ . Первое начало термодинамики будет иметь вид

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

! Подведенное количество теплоты при изобарном процессе расходуется на изменение внутренней энергии и совершение работы над внешними телами.



## МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

### Адиабатный процесс

**Адиабатный процесс** — это процесс, идущий без теплообмена с окружающей средой, т.е. при адиабатном процессе к системе не подводится и не отводится теплота.

Так как при адиабатном процессе теплообмена нет, то  $Q = 0$ . Поэтому первый закон термодинамики примет вид

$$A = -\Delta U.$$

! Работа совершается газом при адиабатном процессе за счет уменьшения его внутренней энергии. Температура газа при этом будет понижаться.

! Если внешние силы сжимают газ, совершая над ним работу, то  $\Delta U = A'$  и температура газа будет повышаться.

### Фазовые превращения

**Количество теплоты**, необходимое для нагревания тела массой  $m$  от температуры  $T_1$  до температуры  $T_2$ , равно

$$Q = cm(T_2 - T_1),$$

где  $c$  — удельная теплоемкость вещества.

**Удельная теплоемкость вещества  $c$**  — это количество теплоты, которое нужно сообщить 1 кг вещества, чтобы повысить его температуру на 1 К.

! Единица удельной теплоемкости в системе СИ  $[c] = \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ .

**Количество теплоты**, необходимое для нагревания тела от температуры  $T_1$  до температуры  $T_2$ , равно

$$Q = C(T_2 - T_1),$$

где  $C$  — теплоемкость тела.

**Теплоемкость тела  $C$**  — это количество теплоты, которое нужно сообщить данному телу, чтобы повысить его температуру на 1 К.

! Единица теплоемкости тела в системе СИ  $[C] = \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$ .

Так как  $Q = C(T_2 - T_1) = cm(T_2 - T_1)$ , то

$$C = cm.$$

### Плавление и кристаллизация

Процесс перехода из твердого в жидкое состояние называется **плавлением**. Температура, при которой это процесс происходит, называется **температурой плавления  $T_{\text{пл}}$** . Процесс перехода из жидкого состояния в твердое называется **кристаллизацией**.

Для того чтобы тело, находящиеся при температуре плавления, расплавить, ему необходимо сообщить **количество теплоты  $Q$** , равное

$$Q_{\text{пл}} = \lambda m,$$

где  $\lambda$  — удельная теплота плавления;  $m$  — масса тела.

**Удельная теплота плавления  $\lambda$**  — это такое количество теплоты, которое необходимо сообщить 1 кг твердого кристаллического вещества, находящегося при температуре плавления, чтобы его расплавить.

! Единица удельной теплоты плавления в системе СИ

$$[\lambda] = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$$

**Количество теплоты**, отдаваемое жидкостью при **кристаллизации**, равно

$$Q_{\text{кр}} = -\lambda m.$$

! Знак «-» указывает на то, что теплота в этом случае отдается, а не сообщается, как при плавлении.



## МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

### Парообразование и конденсация

Процесс перехода из жидкого в газообразное состояние называется **парообразованием**. Температура, при которой это происходит, называется **температурой кипения**  $T_k$ . Процесс перехода из газообразного в жидкое состояние называется **конденсацией**.

Для того чтобы жидкость, находящуюся при температуре кипения, превратить в пар, необходимо сообщить количество теплоты  $Q$ , равное

$$Q_{\text{пар}} = Lm,$$

где  $L$  — удельная теплота парообразования;  
 $m$  — масса жидкости.

**Удельная теплота парообразования**  $L$  — это такое количество теплоты, которое необходимо сообщить 1 кг жидкости, находящейся при температуре кипения, чтобы превратить ее в пар.

! Единица удельной теплоты парообразования в системе

$$\text{СИ } [L] = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$$

При **конденсации** количество теплоты, отдаваемое паром, равно

$$Q_{\text{кон}} = -Lm.$$

! Знак «-» указывает на то, что теплота в этом случае отдается.

### Количество теплоты, выделяемое при сгорании топлива

Количество теплоты, выделяемое при сгорании топлива массой  $m$ :

$$Q_{\text{сг}} = qm.$$

где  $q$  — удельная теплота сгорания топлива.

**Удельная теплота сгорания топлива**  $q$  — это количество теплоты, выделяющееся при сгорании 1 кг топлива.

! Единица удельной теплоты сгорания топлива в системе

$$\text{СИ } [q] = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$$

### Уравнение теплового баланса

При наличии **только теплообмена** между телами **замкнутой системы** выполняется **уравнение теплового баланса**

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots + Q_n = 0,$$

где  $Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_n$  — количества теплоты, полученной или отданной телами системы.

! Теплообмен прекращается при достижении термодинамического равновесия (т.е. когда температура всех тел системы становится одинаковой).

! Уравнение теплового баланса является следствием закона сохранения энергии.

! При составлении уравнения теплового баланса необходимо помнить следующее:

- при плавлении и парообразовании теплота  $Q_{\text{пл}} = \lambda m$  и теплота  $Q_{\text{пар}} = Lm$  положительные;
- при кристаллизации и конденсации теплота  $Q_{\text{кр}} = -\lambda m$  и теплота  $Q_{\text{кон}} = -Lm$  отрицательные.



## МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

### Тепловые двигатели

**Тепловые двигатели** — это устройства, преобразующие энергию сгоревшего топлива в механическую энергию. Тепловые двигатели состоят из нагревателя, рабочего тела и холодильника.

**Принцип действия теплового двигателя.** В тепловом двигателе от нагревателя с температурой  $T_1$  за цикл отнимается количество теплоты  $Q_1$ , а холодильнику с более низкой температурой за цикл передается количество теплоты  $Q_2$ . При этом совершается работа  $A$ . Поскольку тепловой двигатель за цикл возвращается в исходное состояние, то на основании первого закона термодинамики работа за цикл равна

$$A = Q_1 - Q_2$$



**Коэффициент полезного действия (КПД) теплового двигателя**

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

где  $A = Q_1 - Q_2$  — работа, совершаемая двигателем;  
 $Q_1$  и  $Q_2$  — количество теплоты, соответственно полученное от нагревателя и отданное холодильнику.

**Максимальное значение КПД теплового двигателя** равно КПД идеальной тепловой машины, работающей по циклу Карно:

$$\eta_{\max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

где  $T_1$  и  $T_2$  — соответственно температуры нагревателя и холодильника.

**КПД любого реального теплового двигателя не может превышать КПД идеальной тепловой машины с теми же температурами  $T_1$  нагревателя и  $T_2$  холодильника:**

$$\eta \leq \eta_{\max}$$

### Холодильная установка

**Холодильная установка** — это периодически действующее устройство, в котором за счет работы  $A'$  внешних сил теплота переносится от более холодного тела к телу с более высокой температурой.

**Принцип действия холодильной установки.** В холодильной установке за счет совершения внешними силами работы  $A'$  от более холодного тела с температурой  $T_2$  за цикл отнимается количество теплоты  $Q_2$  и отдается во внешнюю среду с температурой ( $T_1 > T_2$ ) количество теплоты, равное  $Q_1$ . Для оценки эффективности работы холодильной установки используют отношение количества теплоты  $Q_2$  отнятого за цикл от холодильной камеры, к работе  $A'$  внешних сил. Эту величину называют **холодильным коэффициентом  $k$**



Холодильный коэффициент  $k$  равен

$$k = \frac{Q_2}{A'} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2}$$



## МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

### Второе и третье начала термодинамики

**Второе начало термодинамики** является обобщением огромного экспериментального материала и указывает на направленность самопроизвольного термодинамического процесса в замкнутой системе. Существует ряд эквивалентных формулировок второго начала термодинамики:

- невозможен процесс, единственным результатом которого является передача энергии в форме теплоты от менее нагретого тела более нагретому телу (формулировка Клаузиуса);
- невозможен процесс, единственным результатом которого является превращение всей теплоты, полученной от нагревателя, в эквивалентную работу (формулировка Кельвина).

! **Второй закон термодинамики** указывает на неравноценность двух форм передачи энергии — работы и теплоты. Переход внутренней энергии в работу возможен лишь при условии, что он сопровождается каким-либо дополнительным процессом. Так, тепловая машина производит работу за счет подводимой от нагревателя теплоты, но при этом часть полученной теплоты передается холодильнику.

**Третье начало термодинамики:** абсолютный нуль температуры недостижим при конечной последовательности термодинамических процессов (т.е. конечного числа операций — циклов работы холодильной машины).

! **Третье начало термодинамики** указывает на то, что к абсолютному нулю температуры можно только асимптотически приблизиться.

## ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ



## ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

## Постулаты теории относительности

В основе теории относительности лежат два постулата, т.е. два основных положения, являющихся результатом обобщения опытных фактов.

**Первый постулат (принцип относительности Эйнштейна):** все физические явления протекают одинаково в любой инерциальной системе отсчета. Это означает, что во всех инерциальных системах отсчета физические законы имеют одинаковую форму (описываются одинаковыми уравнениями).

! Первый постулат теории относительности является обобщением механического принципа относительности Галилея на все физические явления.

**Второй постулат (принцип постоянства скорости света):** скорость света в вакууме одинакова во всех инерциальных системах отсчета. Она не зависит ни от скорости источника, ни от скорости приемника светового сигнала. Скорость света в вакууме является предельной скоростью всех процессов и движений, сопровождаемых переносом энергии.

## Основные следствия, вытекающие из постулатов теории относительности

**Относительность одновременности** — одновременность пространственно разделенных событий относительна, т.е. события, произошедшие одновременно в разных точках одной инерциальной системы отсчета, могут не быть одновременными в другой инерциальной системе отсчета.

## Релятивистский эффект сокращения длины

Длина  $l$  тела, движущегося относительно инерциальной системы со скоростью  $v$ , определяется по формуле

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

где  $l_0$  — длина тела в той инерциальной системе, относительно которой тело покоится (**собственная длина в собственной системе отсчета** т.е. в системе, относительно которой оно покоится).

! Так как  $v < c$ , то  $l < l_0$ .

! Сокращение линейных размеров тела происходит в направлении движения. Поперечные размеры тела при этом не изменяются.

## Релятивистский эффект замедления течения времени

Интервалы времени  $\tau$  и  $\tau_0$  между двумя событиями в разных инерциальных системах связаны:

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

где  $\tau_0$  — интервал времени между двумя событиями, которые произошли с объектом, находящимся в **собственной системе отсчета**, т.е. в системе, относительно которой он покоится (**собственное время**);

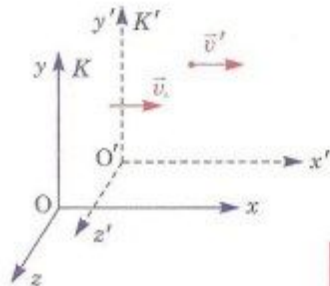
$\tau$  — интервал времени между этими же событиями в системе, относительно которой объект движется со скоростью  $v$ .

! Так как  $v < c$ , то  $\tau > \tau_0$ .



# ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

## Релятивистский закон сложения скоростей



Тело и подвижная система отсчета  $K'$  движутся относительно неподвижной системы отсчета  $K$  в одном направлении. В этом случае скорости тела в разных инерциальных системах связаны соотношением

$$v = \frac{v_0 + v'}{1 + \frac{v_0 v'}{c^2}},$$

где  $v$  — скорость тела относительно неподвижной системы отсчета  $K$ ;

$v_0$  — скорость движения системы отсчета  $K'$  относительно неподвижной системы отсчета  $K$ ;

$v'$  — скорость тела относительно системы  $K'$ .

## Релятивистские масса и импульс

Масса  $m$  тела, движущегося со скоростью  $v$ , равна

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

где  $m_0$  — масса покоя тела, которую оно имеет в собственной системе отсчета.

А импульс тела равен

$$\vec{p} = m\vec{v} = \frac{m_0\vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

## Закон взаимосвязи массы и энергии

Очень важным выводом теории относительности является вывод о том, что масса и энергия  $E$  тела взаимосвязаны.

Полная энергия тела  $E$  определяется соотношением

$$E = mc^2,$$

т.е. энергия тела равна его массе, умноженной на квадрат скорости света.

Изменение энергии тела приводит к изменению его массы, и наоборот:

$$\Delta E = \Delta mc^2.$$

Энергия покоя тела  $E_0$  определяется соотношением

$$E_0 = m_0 c^2,$$

где  $m_0$  — масса покоя тела, которую оно имеет в собственной системе отсчета.

! При условии  $v \ll c$  из релятивистской формулы для кинетической энергии следует классическая формула для кинетической энергии  $K = \frac{mv^2}{2}$ .

Кинетическая энергия  $K$  тела в теории относительности определяется формулой

$$K = E - E_0 = mc^2 - m_0 c^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - m_0 c^2 = m_0 c^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1 \right).$$



## ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

## Взаимосвязь энергии и импульса

Для установления взаимосвязи между импульсом и энергией возведем в квадрат выражение для релятивистской массы  $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ .

Тогда получим  $m^2 = \frac{m_0^2}{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)} \Rightarrow m^2 c^2 - m^2 v^2 = m_0^2 c^2$ .

Умножим выражение на  $c^2$  и преобразуем:

$$m^2 c^4 - m^2 v^2 c^2 = m_0^2 c^4 \Rightarrow E^2 - p^2 c^2 = E_0^2 \Rightarrow \\ \Rightarrow E^2 = E_0^2 + p^2 c^2 \Rightarrow E = \sqrt{E_0^2 + p^2 c^2}.$$

Получили формулу взаимосвязи энергии и импульса

$$E = \sqrt{E_0^2 + p^2 c^2},$$

где  $E$  — полная энергия тела;

$E_0$  — энергия покоя тела;

$p$  — импульс тела.

Выразим из этого выражения импульс тела:

$$E^2 = E_0^2 + p^2 c^2 \Rightarrow p = \frac{1}{c} \sqrt{E^2 - E_0^2}.$$

Найдем формулу взаимосвязи импульса и кинетической энергии.

Так как кинетическая энергия тела равна  $K = E - E_0$ , то

$$E^2 - E_0^2 = (E - E_0)(E + E_0) = K(K + 2E_0).$$

Тогда получим

$$p = \frac{1}{c} \sqrt{E^2 - E_0^2} = \frac{1}{c} \sqrt{K(K + 2E_0)},$$

где  $K$  — кинетическая энергия тела;

$E_0$  — энергия покоя тела.

ЭЛЕМЕНТЫ  
ЯДЕРНОЙ  
ФИЗИКИ



## ЭЛЕМЕНТЫ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

## Состав атомного ядра

Согласно протонно-нейтронной модели ядра атомное ядро состоит из протонов и нейтронов.

! Протоны и нейтроны получили общее название — нуклоны.

! Протоны и нейтроны удерживаются в ядре ядерными силами.

**Протон**  ${}^1_1p$  — элементарная частица, заряд которой положителен и равен элементарному заряду  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл, а масса  $m_p = 1,6724 \cdot 10^{-27}$  кг = 1,00728 а.е.м.

**Нейтрон**  ${}^1_0n$  — это элементарная частица, заряд которой равен 0, а масса близка к массе протона  $m_n = 1,6748 \times 10^{-27}$  кг = 1,00866 а.е.м.

! Массу ядер и элементарных частиц выражают обычно в атомных единицах массы (а.е.м.). За атомную единицу массы принята 1/12 массы атома изотопа углерода  ${}^{12}_6C$ .  
1 а.е.м. =  $1,65976 \cdot 10^{-27}$  кг.

! При точном измерении атомных масс всех элементов было обнаружено, что их массы, вы выраженные в а.е.м., близки к целым числам, которые назвали **массовым числом A**.

Число протонов в ядре равно **зарядовому числу Z**, которое равно порядковому номеру химического элемента в таблице Менделеева.

**Массовое число A** определяет общее число протонов Z и нейтронов N:

$$A = Z + N$$

Число нейтронов в ядре равно  $N = A - Z$ .

Для обозначения ядер применяется символ  ${}^A_ZX$ , где под X подразумевается химический символ элемента. Вверху ставится его массовое число A, внизу — зарядовое число Z.

## Энергия связи

Чтобы расщепить ядро на отдельные нуклоны (протоны и нейтроны), необходимо сообщить ядру некоторую энергию, которую называют **энергией связи ядра**.

Энергия связи ядра  $E_{св}$  равна энергии, которая выделяется при образовании ядра из отдельных частиц:

$$E_{св} = \Delta mc^2 = (Z \cdot m_p + N \cdot m_n - m_{я})c^2,$$

где  $\Delta m$  — дефект масс ядра;

$m_p$ ,  $m_n$  и  $m_{я}$  — массы протона, нейтрона и ядра соответственно.

**Дефект масс** — это разность между суммарной массой всех нуклонов ядра в свободном состоянии и массой ядра:

$$\Delta m = (Z \cdot m_p + N \cdot m_n - m_{я})$$

**Удельная энергия связи** — это энергия связи, приходящаяся на один нуклон ядра:

$$E_{уд} = \frac{E_{св}}{A}$$

! Чем больше удельная энергия связи ядра, тем сильнее связаны между собой нуклоны в нем, а значит, такое ядро более устойчивое.

Если известна масса не ядра, а атомов соответствующего элемента, то для расчета дефекта масс (а следовательно, и энергии связи) можно использовать формулу

$$\begin{aligned} \Delta m &= Z \cdot m_p + N \cdot m_n - (m_{ат} - Z \cdot m_e) = \\ &= Z \cdot m_H + (A - Z) \cdot m_n - m_{ат} \end{aligned}$$

где  $m_e$  — масса электрона;

$m_{ат}$  — масса атома;

$m_H$  — масса атома водорода.



## ЭЛЕМЕНТЫ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

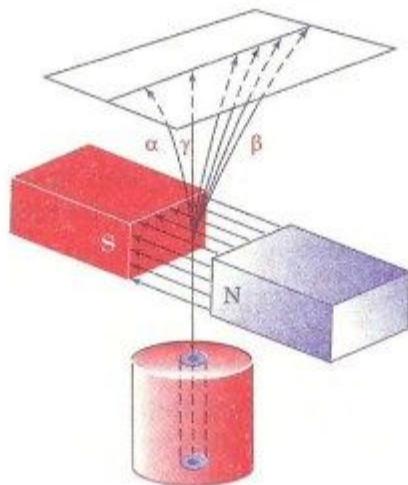
### Явление радиоактивности

**Радиоактивность** — это процесс самопроизвольного превращения одних ядер одного химического элемента в ядра других химических элементов, которое сопровождается испусканием отдельных частиц.

! Из известных в настоящее время около 1500 ядер, отличающихся либо  $Z$ , либо  $N$ , либо тем и другим, только примерно  $1/5$  часть из них устойчива, остальные **радиоактивны**.

### Радиоактивное излучение

**Радиоактивный распад** сопровождается излучением. Радиоактивное излучение имеет сложный состав. В магнитном поле узкий пучок радиоактивного излучения расщепляется на три компонента  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -лучи.



### $\alpha$ -распад

$\alpha$ -лучи представляют собой поток быстро движущихся ядер гелия  ${}^4_2\text{He}$  ( $\alpha$ -частиц). Они обладают высокой ионизирующей способностью и малой проникающей способностью.

$\alpha$ -распад описывается следующим правилом смещения:



где  $X$  — материнское ядро;

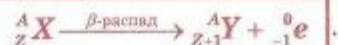
$Y$  — дочернее ядро.

!  $\alpha$ -распад происходит только с ядрами с большим массовым числом  $A$  ( $A > 200$ ).

### $\beta$ -распад

$\beta$ -лучи представляют собой поток быстрых электронов. Они обладают большей проникающей способностью, а ионизирующая способность значительно меньше, чем у  $\alpha$ -лучей.

Правило смещения для  $\beta$ -распада:



### $\gamma$ -излучение

$\gamma$ -лучи представляют собой электромагнитное излучение с очень малой длиной волны ( $\lambda < 10^{-10}$  м), т.е. являются фактически потоком  $\gamma$ -квантов. Они обладают сравнительно невысокой ионизирующей способностью и высокой проникающей способностью.

! При  $\gamma$ -излучении массовое число  $A$  и зарядовое число  $Z$  ядра не изменяются.

!  $\gamma$ -излучение не является самостоятельным видом распада, а только сопровождает  $\alpha$ - и  $\beta$ -распады.



## ЭЛЕМЕНТЫ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

## Закон радиоактивного распада

Закон радиоактивного распада имеет вид

$$N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}} \text{ или } N = N_0 \cdot e^{-\lambda t},$$

где  $N$  — число ядер, которые не распались к моменту времени  $t$ ;

$N_0$  — начальное число ядер (в момент времени  $t = 0$ );

$T_{1/2}$  — период полураспада;

$\lambda$  — постоянная радиоактивного распада ( $\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$ );

$e$  — основание натурального логарифма ( $e = 2,7183$ ).

**Период полураспада** — это время, в течение которого распадается половина имеющегося числа радиоактивных ядер.

**Число распавшихся ядер  $\Delta N$**  будет равно

$$\Delta N = N_0 - N = N_0 \left( 1 - 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}} \right) \\ \text{или} \\ \Delta N = N_0 - N = N_0 (1 - e^{-\lambda t}).$$

! Радиоактивный распад является статистическим (вероятностным) процессом.

! Закон радиоактивного распада определяет **среднее число атомов**, распадающихся за определенный интервал времени.

## Активность радиоактивного препарата

**Активность радиоактивного препарата** — это физическая величина, равная числу распадов, происходящих в препарате за единицу времени.

Если за время  $\Delta t$  распадется  $\Delta N$  ядер, то активность равна

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

Из закона радиоактивного распада следует, что

$$A = \lambda N_0 = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t},$$

где  $A_0 = \lambda N_0$  — начальная активность препарата.

! Единица активности в системе СИ  $[A] = 1 \text{ Бк}$  (беккерель).

! Внесистемной единицей активности является **Ku** (кюри).

! Единица активности в 1 кюри — это активность такого препарата, в котором происходит  $3,7 \cdot 10^{10}$  актов распада в секунду ( $1 \text{ Ку} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$ ).

## Ядерные реакции

**Ядерная реакция** — это процесс взаимодействия атомного ядра с элементарной частицей или другим ядром, приводящий к преобразованию ядра или ядер.

! Ядерные реакции протекают в точном соответствии с законами сохранения электрического заряда, энергии, импульса и числа нуклонов (массового числа  $A$ ).

**Энергетический выход реакции** рассчитывается по формуле

$$\Delta E = \Delta mc^2,$$

где  $\Delta m = \sum_i m_i - \sum_j m_j$  — разность суммарных масс всех частиц до реакции  $\sum_i m_i$  и после нее  $\sum_j m_j$ .

! Если  $\Delta E > 0$ , то реакция идет с выделением энергии и ее называют **экзотермической**, если  $\Delta E < 0$ , то реакция идет с поглощением энергии и ее называют **эндотермической**.



## ЭЛЕМЕНТЫ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

## Основы дозиметрии

Излучения радиоактивных веществ оказывают очень сильное воздействие на все живые организмы. Характер этого воздействия зависит от поглощенной дозы излучения и от его вида.

**Поглощенная доза излучения  $D$**  — это величина, равная отношению энергии  $\Delta W$  излучения, поглощенной облучаемым телом, к его массе  $m$ :

$$D = \frac{\Delta W}{m}$$

! Единица поглощенной дозы в системе СИ  $[D] = 1 \text{ Гр}$  (грей).

! Внесистемная единица поглощенной дозы  $[D] = 1 \text{ рад}$ .  
 $1 \text{ рад} = 0,01 \text{ Гр}$ .

! Поглощенная доза определяется энергией излучения и его ионизирующей способностью.

**Мощность поглощенной дозы излучения  $N$**  — это величина, равная поглощенной дозе излучения, отнесенной к единице времени:

$$N = \frac{D}{t}$$

! Единица мощности поглощенной дозы в системе СИ

$$[N] = 1 \frac{\text{Гр}}{\text{с}}$$

! Внесистемная единица мощности поглощенной дозы

$$[N] = 1 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

**Экспозиционная доза излучения  $D_s$**  — это величина, равная отношению суммарного заряда  $q$  ионов, образованных излучением, к массе  $m$  тела:

$$D_s = \frac{q}{m}$$

! За единицу принимают интенсивность такого излучения, которое производит в **1 кг** сухого воздуха такое число ионов, суммарный заряд которых составляет **1 Кл** каждого знака.

! Единица экспозиционной дозы в системе СИ  $[D_s] = 1 \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}$ .

! На практике часто используется внесистемная единица **рентген (Р)**. Эта единица является мерой ионизирующей способности рентгеновского излучения и гамма-излучения. Доза излучения равна одному рентгену, если в **1 см<sup>3</sup>** сухого воздуха при температуре **0 °С** и давлении **760 мм рт. ст.** образуется столько ионов, что их суммарный заряд каждого знака в отдельности равен  **$3 \cdot 10^{10}$  Кл**.

$$1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$$

**Эквивалентная доза поглощенного излучения** — это величина, равная произведению поглощенной дозы  $D$  на коэффициент  $k$  качества излучения. **Коэффициент качества излучения  $k$**  показывает, во сколько раз поражающее действие данного вида излучения выше, чем рентгеновского, при одинаковой дозе поглощенного излучения:

$$D_{\text{экв}} = k \cdot D$$

! Единица эквивалентной дозы в системе СИ  $[D_{\text{экв}}] = 1 \text{ Зв}$  (зиверт).

! 1 Зв соответствует поглощенной дозе **1 грэй** при коэффициенте качества излучения, равном единице.

! На практике для измерения эквивалентной дозы поглощенного излучения используют внесистемную единицу **бэр** (биологический эквивалент рентгена).

$$1 \text{ бэр} = 0,01 \text{ Зв}$$



## ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПОСТОЯННЫЕ

Постоянная	Обозначение	Числовое значение
Гравитационная постоянная	$G$	$6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}$
Скорость света в вакууме	$c$	$3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$
Атомная единица массы	а.е.м.	$1,65976 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Постоянная Авогадро	$N_A$	$6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Универсальная газовая постоянная	$R$	$8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$
Постоянная Больцмана	$k$	$1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$
Объем 1 моля идеального газа при н.у. ( $p = 10^5 \text{ Па}$ , $T = 273 \text{ К}$ )	$V_m$	$22,41 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{моль}}$
Магнитная постоянная	$\mu_0$	$4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$
Электрическая постоянная	$\epsilon_0$	$8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{м}}$
Постоянная Планка	$h$	$6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Масса покоя электрона	$m_e$	$9,109 \cdot 10^{-31} \text{ кг} =$ $= 5,486 \cdot 10^{-4} \text{ а.е.м.}$

Постоянная	Обозначение	Числовое значение
Энергия покоя электрона	$m_e c^2$	0,511 МэВ
Масса покоя протона	$m_p$	$1,673 \cdot 10^{-27} \text{ кг} =$ $= 1,00728 \text{ а.е.м.}$
Энергия покоя протона	$m_p c^2$	938,3 МэВ
Масса покоя нейтрона	$m_n$	$1,675 \cdot 10^{-27} \text{ кг} =$ $= 1,00866 \text{ а.е.м.}$
Энергия покоя нейтрона	$m_n c^2$	939,6 МэВ
Отношение массы протона к массе электрона	$m_p/m_e$	1836,2
Элементарный заряд	$e$	$1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Отношение заряда электрона к его массе (удельный заряд)	$e/m_e$	$1,759 \cdot 10^{11} \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}$
Постоянная Фарадея	$F = eN_A$	$96484,56 \frac{\text{Кл}}{\text{моль}}$
Радиус первой боровской орбиты	$a_0$	$0,529 \cdot 10^{-10} \text{ м}$
Постоянная Ридберга	$R$	$10973731,77 \text{ м}^{-1}$
<b>Энергетические эквиваленты:</b>		
1 а.е.м.		931,5 МэВ
1 эВ (электрон-вольт)		$1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$



## СОДЕРЖАНИЕ

<b>МЕХАНИКА</b> .....	3
<b>ОСНОВЫ КИНЕМАТИКИ</b> .....	4
Способы задания движения материальной точки .....	5
Скорость .....	6
Ускорение .....	7
Относительность движения .....	7
Равномерное прямолинейное движение .....	8
Равнопеременное прямолинейное движение .....	9
Свободное падение тел .....	10
Движение тела, брошенного горизонтально .....	11
Движение тела, брошенного под углом к горизонту .....	12
Линейная и угловая скорости .....	14
Равномерное движение по окружности .....	16
<b>ОСНОВЫ ДИНАМИКИ</b> .....	18
Законы Ньютона .....	20
Сила упругости .....	22
Сила трения .....	24
Сила тяготения .....	26
Движение искусственных спутников .....	28
<b>ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ В МЕХАНИКЕ</b> .....	30
Закон сохранения импульса .....	30
Работа .....	31
Кинетическая энергия .....	31
Потенциальная энергия .....	32
Полная механическая энергия .....	33
Закон сохранения полной механической энергии .....	33
Мощность .....	34
Коэффициент полезного действия .....	35

<b>ЭЛЕМЕНТЫ СТАТИКИ</b> .....	36
Момент силы .....	37
Условие равновесия тела, которое может двигаться поступательно .....	37
Условие равновесия тела, которое может вращаться относительно неподвижной оси .....	38
Условие равновесия тела, которое может двигаться поступательно и вращаться .....	38
Центр тяжести. Центр масс .....	39
Равновесие тела на опоре .....	39
<b>ПРОСТЫЕ МЕХАНИЗМЫ</b> .....	40
Рычаг .....	40
Наклонная плоскость .....	41
Блок .....	41
Золотое правило механики .....	41
<b>ЭЛЕМЕНТЫ ГИДРОСТАТИКИ</b> .....	42
Давление .....	42
Гидростатическое давление .....	42
Закон Паскаля .....	43
Сообщающиеся сосуды .....	44
Гидравлический пресс .....	45
Атмосферное давление .....	46
Закон Архимеда .....	46
Условия плавания тела .....	47
<b>ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ</b> .....	49
<b>ЭЛЕКТРОСТАТИКА</b> .....	50
Свойства электрического заряда .....	50
Закон сохранения электрического заряда .....	51
Закон Кулона .....	52
Электрическое поле .....	53



Напряженность электрического поля .....	53
Напряженность электрического поля точечного заряда .....	54
Принцип суперпозиции электрических полей .....	54
Линии напряженности электрического поля .....	55
Графическое представление электростатических полей .....	56
Потенциал электрического поля .....	57
Потенциал электрического поля точечного заряда .....	57
Потенциальная энергия взаимодействия двух точечных зарядов .....	57
Принцип суперпозиции для потенциалов .....	58
Эквипотенциальные поверхности .....	58
Работа электростатического поля при перемещении заряда .....	59
Связь между напряжением и напряженностью для однородного электростатического поля .....	60
Электростатическое поле, создаваемое проводящей заряженной сферой или шаром .....	60
Электростатическое поле, создаваемое бесконечной однородно заряженной плоскостью .....	62
Емкость уединенного проводника .....	63
Емкость конденсатора .....	64
Плоский конденсатор .....	65
Сферический конденсатор .....	65
Напряженность электрического поля плоского конденсатора .....	66
Соединение конденсаторов .....	67
Энергия заряженного конденсатора .....	68
Энергия заряженного уединенного проводника .....	69
Энергия и плотность энергии электрического поля .....	69

<b>ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК</b> .....	70
Электрический ток .....	70
Условия существования электрического тока .....	70
Сила тока .....	71
Плотность тока .....	72
Закон Ома для однородного участка цепи .....	73
Сопротивление проводника .....	74
Последовательное и параллельное соединение проводников .....	76
Шунт .....	78
Добавочное сопротивление .....	78
Работа и мощность тока .....	79
Закон Джоуля-Ленца .....	80
Электродвижущая сила (ЭДС) .....	80
Закон Ома для неоднородного участка цепи .....	81
Закон Ома для полной цепи .....	82
Последовательное соединение источников тока .....	84
Параллельное соединение источников тока .....	84
Правила Кирхгофа .....	85
Электрический ток в электролитах .....	86
<b>МАГНИТНОЕ ПОЛЕ</b> .....	88
Вектор магнитной индукции .....	88
Линии магнитной индукции .....	90
Магнитное поле бесконечно длинного прямого проводника с током .....	91
Магнитное поле кругового тока .....	91
Магнитное поле соленоида .....	92
Магнитное поле тороида .....	92
Принцип суперпозиции магнитных полей .....	93
Сила Ампера .....	93



Сила Лоренца .....	94
Движение заряженных частиц в магнитном поле .....	95
<b>ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ</b> .....	98
Магнитный поток .....	98
Электромагнитная индукция .....	99
Закон Фарадея-Ленца .....	100
Механизмы возникновения ЭДС индукции .....	102
ЭДС индукции, возникающей в движущемся проводнике .....	103
Принцип действия простейшего генератора переменного тока .....	105
Явление самоиндукции .....	106
Индуктивность .....	107
Индуктивность соленоида .....	107
Энергия и плотность энергии магнитного поля .....	108
<b>МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ</b> .....	109
<b>МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ</b> .....	110
Характеристики гармонических колебаний .....	111
Уравнение гармонических колебаний .....	112
Дифференциальное уравнение гармонических колебаний .....	113
Пружинный маятник .....	114
Математический маятник .....	115
Превращение энергии при колебательном движении .....	118
Затухающие колебания .....	120
Вынужденные колебания .....	121
<b>МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ</b> .....	122
Уравнение волны .....	123
Длина волны .....	124

Звуковые волны .....	125
Эффект Доплера .....	126
<b>ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ</b> .....	127
<b>ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ</b> .....	128
Колебательный контур .....	128
Идеальный колебательный контур .....	128
Реальный колебательный контур .....	130
Вынужденные электромагнитные колебания .....	131
Переменный электрический ток .....	132
Закон Ома для последовательного участка цепи переменного тока .....	134
Активное сопротивление в цепи переменного тока .....	136
Индуктивное сопротивление в цепи переменного тока .....	137
Емкостное сопротивление в цепи переменного тока .....	138
Метод векторных диаграмм .....	139
Резонанс в электрической цепи переменного тока .....	140
Трансформатор .....	142
Электромагнитные волны .....	145
Шкала электромагнитных волн .....	146
Классификация радиоволн .....	146
<b>ОПТИКА</b> .....	147
<b>ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА</b> .....	148
Закон прямолинейного распространения света .....	148
Закон независимости световых лучей .....	148
Принцип Ферма .....	148
Законы отражения и преломления света .....	149
Закон полного внутреннего отражения .....	152



Ход лучей в плоскопараллельной пластинке .....	153
Ход лучей в призме .....	154
Линзы .....	156
Построение изображений в линзе .....	160
Построение изображения точки, расположенной на главной оптической оси собирающей линзы .....	164
Построение изображения точки, расположенной на главной оптической оси рассеивающей линзы .....	165
<b>ВОЛНОВАЯ ОПТИКА</b> .....	166
Интерференция света .....	166
Интерференция от двух когерентных источников .....	167
Интерференция в тонких пленках .....	170
Просветление оптики .....	174
Интерференция в клиновидной пленке .....	176
Дифракция света .....	178
Дифракция света на узкой щели .....	179
Дифракция света на дифракционной решетке .....	180
Дисперсия света .....	182
Квантовая природа излучения .....	183
<b>КВАНТОВЫЕ СВОЙСТВА СВЕТА</b> .....	184
Внешний фотоэффект. Опыты Столетова .....	184
Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта .....	186
Давление света .....	187
Корпускулярно-волновой дуализм .....	188
Гипотеза де Бройля .....	188
<b>ЭЛЕМЕНТЫ АТОМНОЙ ФИЗИКИ</b> .....	189
<b>ЭЛЕМЕНТЫ АТОМНОЙ ФИЗИКИ</b> .....	190
Спектр атома водорода .....	190
Строение атома .....	190

Постулаты Бора .....	191
Теория Бора для атома водорода .....	192
<b>МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА</b> .....	195
<b>МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА</b> .....	196
Основные положения молекулярно-кинетической теории .....	196
Идеальный газ .....	196
Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа .....	196
Уравнение Клапейрона–Менделеева .....	197
Абсолютная температура .....	198
Уравнение Клапейрона .....	199
Закон Дальтона .....	199
Изопроцессы .....	200
Влажность воздуха .....	202
Внутренняя энергия .....	204
Первое начало термодинамики .....	205
Внутренняя энергия идеального газа .....	206
Работа газа при изобарном процессе .....	207
Применение первого начала термодинамики к изопроцессам .....	207
Адиабатный процесс .....	208
Фазовые превращения .....	208
Плавление и кристаллизация .....	209
Парообразование и конденсация .....	210
Количество теплоты, выделяемое при сгорании топлива .....	211
Уравнение теплового баланса .....	211
Тепловые двигатели .....	212
Холодильная установка .....	213
Второе и третье начала термодинамики .....	214



<b>ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ.....</b>	<b>215</b>
<b>ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ.....</b>	<b>216</b>
Постулаты теории относительности .....	216
Основные следствия, вытекающие из постулатов теории относительности .....	216
Релятивистский закон сложения скоростей .....	218
Релятивистские масса и импульс .....	218
Закон взаимосвязи массы и энергии.....	219
Взаимосвязь энергии и импульса .....	220
<b>ЭЛЕМЕНТЫ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ .....</b>	<b>221</b>
<b>ЭЛЕМЕНТЫ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ .....</b>	<b>222</b>
Состав атомного ядра .....	222
Энергия связи .....	223
Явление радиоактивности.....	224
Радиоактивное излучение .....	224
Закон радиоактивного распада .....	226
Активность радиоактивного препарата .....	227
Ядерные реакции .....	227
Основы дозиметрии .....	228
<b>ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПОСТОЯННЫЕ .....</b>	<b>230</b>



Данное пособие оставлено в виде таблиц, систематизирующих и обобщающих теоретические сведения по школьному курсу физики. В книге в полном объеме и доступной форме изложены все разделы физики, изучаемые в средней школе. Пособие рекомендуется использовать для коллективной работы в школе и индивидуальных занятий дома.

ISBN 978-985-513-887-8



9 789855 138878

По вопросам реализации обращаться в ООО «ИНТЕРПРЕССЕРВИС».

Тел. в Минске: (10375-17)-255-76-90, 253-58-30, 228-53-91, 228-53-92.

Тл. в Москве: (495)-233-91-88, 482-18-41.

E-mail: [interpress@open.by](mailto:interpress@open.by)

[Http://www.interpres.ru](http://www.interpres.ru)

Интернет-магазин OZ.by



УДК 53(075.3)(035)

ББК 22.3я721

Ф50

Составитель

Тульев Валентин Валентинович,  
кандидат физико-математических наук

Физика. Весь школьный курс в таблицах / сост. В. В. Тульев —  
Ф50 Минск : Современная школа : Кузьма, 2010. — 4-е изд. — 240 с.

ISBN 978-985-513-887-8 (Современная школа).

ISBN 978-985-453-305-6 (Кузьма).

Данное пособие составлено в виде таблиц, систематизирующих и обобщающих теоретические сведения по школьному курсу физики.

В книге в доступной форме изложены все разделы физики, изучаемые в средней школе.

Пособие рекомендуется использовать для коллективной работы в школе и индивидуальных занятий дома.

УДК 53(075.3)(035)

ББК 22.3я721

Справочное издание

**ФИЗИКА**

**ВСЕШКОЛЬНЫЙ КУРС В ТАБЛИЦАХ**

Составитель

**ТУЛЬЕВ Валентин Валентинович**

Ответственный за выпуск В. В. Литвин

Подписано в печать с готовых диапозитивов 25.02.2010.

Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Гарнитура «Schoolbook».

Печать офсетная. Усл. печ. л. 13,95. Уч.-изд. л. 8,44.

Тираж 10050 экз. Заказ 704.

ООО «Современная школа»

ЛИ № 02330/0494010 от 08.01.2009. Ул. П. Глебки, д. 11, 220104, г. Минск.

ООО «Кузьма»

ЛИ № 02330/0494019 от 08.01.2009. Ул. Красная, д. 23, к. 42, 220600, г. Минск

e-mail: kuzma@anitex.by, http: www.kuzma.anitex.by.

Республиканское унитарное предприятие

«Издательство «Белорусский Дом печати».

ЛП № 02330/0494179 от 03.04.2009.

Пр. Независимости, 79, 220013, Минск.

© Тульев В. В., составление, 2007

ISBN 978-985-513-887-8 (Современная школа) © ООО «Современная школа», 2010

ISBN 978-985-453-305-6 (Кузьма) © Оформление. ООО «Кузьма», 2010

# МЕХАНИКА