

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

По характеру движения точек различают три вида движения:

а) *поступательное* — это движение, при котором все точки тела движутся одинаково и любая прямая, мысленно проведенная в теле, остаётся параллельна сама себе;

б) *вращательное* движение, при котором все точки тела движутся по окружностям;

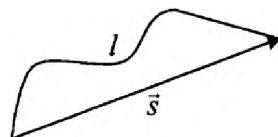
в) *колебательное* движение — движение, которое повторяется или почти повторяется. В отличие от вращательного движения колебательное происходит в двух взаимно противоположных направлениях.

**Материальная точка** — это тело, размерами которого можно пренебречь в условиях данной задачи. Тело можно принять за материальную точку, если оно движется поступательно или если его размеры много меньше расстояний, которые тело проходит.

**Систему отсчёта** вводят для того, чтобы задать положение материальной точки в пространстве. В неё входят: тело отсчёта (любое тело), система координат (одномерная, двумерная или трёхмерная) и часы (начало отсчёта времени совпадает с началом движения тела).

**Путь  $l$  (м)** — длина траектории.

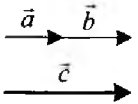
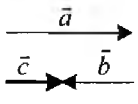
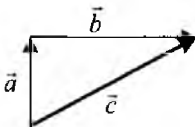
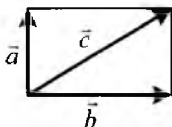
**Перемещение  $\vec{s}$  (м)** — это вектор, соединяющий начальное положение тела с конечным. Обычно  $l > |\vec{s}|$ ;  $l = |\vec{s}|$ , если тело движется по прямой в одну сторону.



Длина гипотенузы по теореме Пифагора $c = \sqrt{a^2 + b^2}$	
Длина окружности $l = 2\pi R = \pi d$	$R, d$ — радиус и диаметр окружности

### Векторное сложение

$$\vec{c} = \vec{a} + \vec{b}.$$

Сложение векторов, направленных вдоль одной прямой	
$\vec{a} \uparrow \uparrow \vec{b}$  $c = a + b$	$\vec{a} \downarrow \uparrow \vec{b}$  $c =  a - b $
Сложение векторов, перпендикулярных друг другу $\vec{a} \perp \vec{b}$	
<i>Правило треугольника</i> 	<i>Правило параллелограмма</i> 
По теореме Пифагора $c = \sqrt{a^2 + b^2}$	

**Равномерное прямолинейное движение** — движение, при котором тело за любые равные промежутки времени, совершает равные перемещения.

**Скорость при равномерном прямолинейном движении**

Скорость  $\vec{v}$  (м/с) — векторная физическая величина, которая показывает, какое перемещение совершает тело за единицу времени.

В векторном виде:

$$\vec{v} = \frac{\vec{s}}{t} = \frac{\Delta \vec{R}}{\Delta t}.$$

Путь и проекция перемещения:  $l = s_x$ ;  $s_x = v_x t$ .

Уравнение координаты:  $x = x_0 + v_x t$ .

**Равноускоренное прямолинейное движение** — движение по прямой с постоянным ускорением ( $\vec{a} = \text{const}$ ).

**Ускорение  $\vec{a}$  (м/с<sup>2</sup>)** — векторная физическая величина, показывающая, на сколько изменяется скорость тела за 1 с.

В векторном виде:

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

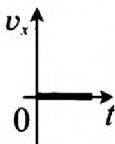
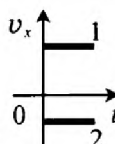
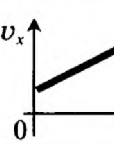
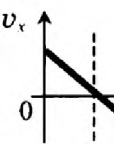
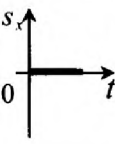
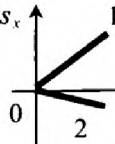
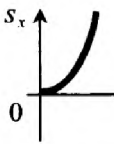
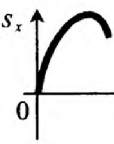
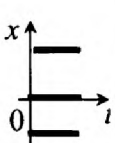
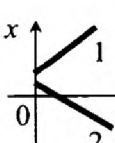
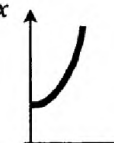

**Основные формулы для расчёта перемещения**

$$s = v_0 t \pm \frac{at^2}{2} \text{ (без конечной скорости),}$$

**Уравнение координаты при равноускоренном прямолинейном движении** позволяет определить кинематические величины равноускоренного прямолинейного движения даже в тех случаях, когда направление движения меняется.

Уравнение координаты

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

	<b>Покой</b>	<b>Равномерное движение</b>	<b>Равноускоренное движение</b>	<b>Равнозамедленное движение</b>
	$a_x = 0$ $v_x = 0$ $s_x = 0$ $x = x_0$	$a_x = 0$ $v_x = \text{const}$ $s_x = v_x t$ $x = x_0 + v_x t$ $\vec{v}_1 \uparrow \uparrow OX$ $\vec{v}_2 \uparrow \downarrow OX$	$a_x = \text{const},$ $\vec{a} \uparrow \uparrow \vec{v}_0, \vec{v}_0 \uparrow \uparrow OX$ $v_x = v_0 + at$ $s_x = v_0 t + \frac{at^2}{2}$ $x = x_0 + v_0 t + \frac{at^2}{2}$	$a_x = \text{const},$ $\vec{a} \uparrow \downarrow \vec{v}_0, \vec{v}_0 \uparrow \uparrow OX$ $v_x = v_0 - at$ $s_x = v_0 t - \frac{at^2}{2}$ $x = x_0 + v_0 t - \frac{at^2}{2}$
$v_x(t)$				
$s_x(t)$				
$x(t)$				

### Свободное падение

- Свободное падение происходит под действием только силы тяжести.
- Все тела независимо от массы падают в вакууме с одинаковым ускорением.
- Ускорение свободного падения всегда направлено вниз, к центру Земли и равно  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ ; в задачах будем считать  $g = 10 \text{ м/с}^2$ .

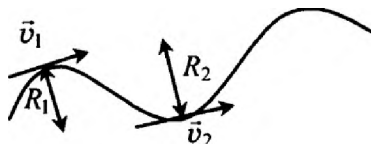
Скорость

$$v = v_0 \pm gt.$$

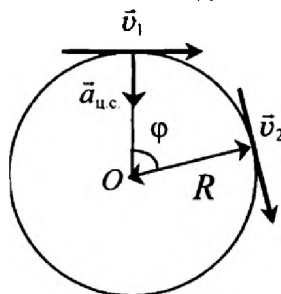
Перемещение, высота

$$s = h = \frac{(v + v_0)t}{2}, \quad s = h = v_0 t \pm \frac{gt^2}{2}, \quad s = h = \frac{v^2 - v_0^2}{\pm 2g}.$$

**Криволинейное движение** — движение, траекторией которого является кривая линия. Вектор скорости в любой момент времени направлен по касательной к траектории. Любой участок криволинейного движения можно представить в виде движения по дуге окружности или по участку ломаной.



**Движение по окружности с постоянной по модулю скоростью** — простейший вид криволинейного движения. Это движение с переменным ускорением.



**Частота  $\nu$  (Гц)** — число полных оборотов за 1 с

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

**Линейная скорость  $v$  (м/с)** показывает, какой путь проходит тело за 1 с

$$v = 2\pi R\nu$$

**Угловая скорость  $\omega$  (рад/с)** показывает, на какой угол поворачивает тело за 1 с

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

**Центростремительное ускорение  $a_{\text{у.с.}}$  (м/с<sup>2</sup>)** изменяет направление вектора скорости

$$a_{\text{у.с.}} = \frac{v^2}{R}$$

**Число оборотов  $N$**  — число полных оборотов за время  $t$

$$N = \frac{t}{T} = \nu.$$

**Инерциальные системы отсчёта** — системы отсчёта, относительно которых наблюдается инерция, а также те, которые движутся равномерно и прямолинейно относительно ИСО. (ИСО — системы, ускорение которых равно нулю.)

**Первый закон Ньютона:** *существуют такие системы отсчёта, называемые инерциальными, относительно которых тела движутся равномерно и прямолинейно или находятся в состоянии покоя, если на них не действуют другие тела или их действия скомпенсированы.*

**Инертность** — физическое свойство, заключающееся в том, что любое тело оказывает сопротивление изменению его скорости (как по модулю, так и по направлению).

**Масса  $m$  (кг)** — физическая величина, являющаяся мерой инертности тела.

$$m = \rho \cdot V,$$

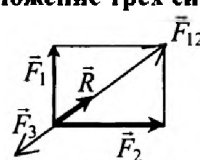

где  $\rho$  (кг/м<sup>3</sup>) — плотность,  $V$  (м<sup>3</sup>) — объём.

**Сила  $\vec{F}$  (Н)** — количественная характеристика действия одного тела на другое. Сила — *векторная величина*, которая имеет числовое значение; направление в пространстве; точку приложения. Точкой приложения всех сил в динамике (кроме веса) является *центр тяжести тела*. Измерительный прибор — *динамометр*.

**Второй закон Ньютона:** *сила, действующая на тело, равна произведению массы этого тела на ускорение, которое сообщает эта сила.*

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

**Учитите:** направление силы совпадает с направлением ускорения  $\vec{F} \uparrow \uparrow \vec{a}$ , так как  $m > 0$ .

Сложение трёх сил	
<p><b>Сложение трёх сил</b></p>  $F_{12} = \sqrt{F_1^2 + F_2^2}$ $R = F_{12} - F_3$	<p><b>Сложение проекций сил</b></p>  $OX: F_{1x} + F_{2x} - F_{3x} = 0$ $OY: F_{1y} - F_{2y} = 0$ $R = 0$

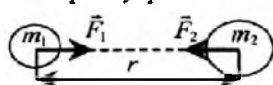
**Третий закон Ньютона:** *тела действуют друг на друга с силами, направленными вдоль одной прямой, противоположными по направлению и равными по модулю.*  $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$

**Сила всемирного тяготения** — сила, с которой все тела притягиваются друг к другу. Эта сила наиболее заметно проявляется при взаимодействии массивных тел (звёзд, планет, их спутников).

Закон всемирного тяготения выполняется для материальных точек и сферических тел.

**Закон всемирного тяготения:** *все тела в природе притягиваются друг к другу с силой, прямо пропорциональной произведению масс этих тел и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними:*

$$F_m = \frac{Gm_1m_2}{r^2},$$



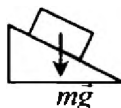
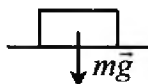
где  $G = 6,7 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$  — гравитационная постоянная, численно равная силе гравитационного притяжения двух тел массой по 1 кг каждое, находящихся на расстоянии 1 м одно от другого;

$m$  (кг) — масса тела;

$r$  (м) — расстояние между центрами тел.

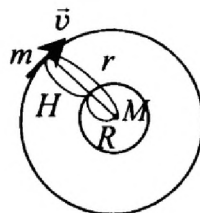
Сила всемирного тяготения направлена по линии, соединяющей центры тел.

**Сила тяжести** — сила, с которой планета (Земля) притягивает к себе окружающие тела. Сила тяжести имеет *гравитационную* природу. Направление силы тяжести — вертикально вниз или к центру планеты:



**Искусственный спутник планеты** — тело, которое обращается вокруг планеты. Движение искусственных спутников происходит по эллипсам, но мы будем рассматривать упрощённый частный случай — движение по окружности. Скорость кругового движения, при котором радиус орбиты равен радиусу планеты называют *первой космической скоростью*.

$$F_{\text{грав}} = ma_{\text{ц.с.}} \text{ или } \frac{GMm}{(R+H)^2} = ma_{\text{ц.с.}}$$



$M$  (кг) — масса планеты,  $m$  (кг) — масса спутника,  $R$  (м) — радиус планеты,  $H$  (м) — высота спутника над поверхностью планеты,  $r$  (м) — расстояние от центра планеты до спутника ( $r = R + H$  — радиус орбиты),  $v$  (м/с) — линейная скорость спутника

**Сила упругости** — сила, которая возникает при деформациях тел как ответная реакция на внешнее воздействие. Сила упругости имеет электромагнитную природу.

**Деформация** — изменение формы или объёма тела.

Виды деформаций: растяжение; сжатие; изгиб (комбинированный случай одновременного сжатия и растяжения); сдвиг; кручение (частный случай деформации сдвига).

Упругие деформации исчезают после снятия нагрузки.

Пластические деформации остаются после снятия нагрузки.

Только для упругих деформаций выполняется закон Гука.

**Закон Гука:** модуль силы упругости, возникающей при деформации тела, пропорционален его удлинению

$$F_{\text{упр}} = kx,$$

$x$  (м) — деформация или абсолютное удлинение  $x = |l - l_0| = \Delta l$ , где  $l_0$  (м) — начальная длина тела,  $l$  (м) — длина деформированного тела;  $k$  (Н/м) — жёсткость тела.

Сила упругости ( $\vec{F}_{\text{упр}}$ ) направлена противоположно перемещению частиц при деформации.

**Сила трения** возникает при движении тел или при попытке сдвинуть их с места. Относится к силам электромагнитной природы. Трение бывает сухое и жидкое. Сухое делится на три вида: *трение покоя*, *трение скольжения* и *трение качения*.

**Трение скольжения** возникает при скольжении одного тела по поверхности другого. Направление трения скольжения противоположно скорости движения ( $\vec{F}_{\text{тр. ск.}} \uparrow \downarrow \vec{v}$ ):

$$F_{\text{тр.ск.}} = \mu N \text{ или } F_{\text{тр.ск.}} = \mu F_{\text{давл.}},$$

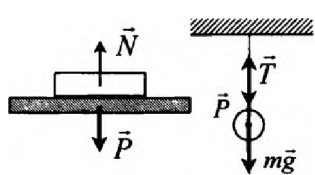
где  $\mu$  — коэффициент трения,  $N$  (Н) — сила реакции опоры,  $F_{\text{давл.}}$  (Н) — сила нормального давления.

Способы уменьшения трения: выравнивание поверхностей; введение смазки; замена на трение качения.

**Учитите:** если движение происходит по гладкой поверхности, то силу трения учитывать не надо; сила трения скольжения не зависит от площади соприкасающихся тел.

<p>4. Сила тяги направлена под углом к горизонту (вверх)</p> <p>Второй закон Ньютона в векторной форме: <math>m\vec{g} + \vec{N} + \vec{F}_T + \vec{F}_{\text{тр}} = m\vec{a}</math></p> <p><math>OX: F_T \cos \alpha - F_{\text{тр}} = ma</math></p> <p><math>OY: F_T \sin \alpha + N - mg = 0</math></p>	<p>Внимание: <math>N \neq mg</math></p> 
<p>4. Равноускоренное движение вверх с учётом силы трения</p> <p>Второй закон Ньютона в векторной форме:</p> $m\vec{g} + \vec{N} + \vec{F}_T + \vec{F}_{\text{тр}} = m\vec{a}$ <p><math>OX: F_T - mg \sin \alpha - F_{\text{тр}} = ma</math></p> <p><math>OY: N - mg \cos \alpha = 0</math></p>	

**Вес тела** — сила, с которой тело вследствие притяжения к Земле действует на опору или подвес (сила, с которой тело давит на опору или растягивает подвес), относится к силам электромагнитной природы. Измеряется *динамометром*. Единица измерения — ньютон (Н).

<p>Точка приложения — точка опоры или подвеса</p>	
<p>Направление</p>	<p>Вес имеет направление, противоположное силе реакции опоры или силе натяжения нити</p> $\vec{P} \downarrow \vec{N}; \vec{P} \downarrow \vec{T}$



Способ определения модуля веса	По третьему закону Ньютона, $P = N$ , или $P = T$ , или $P = F_{\text{упр}}$
<p>6. Полный оборот на подвесе Второй закон Ньютона в векторной форме:</p> $\vec{T} + m\vec{g} = m\vec{a}_{\text{ц.с.}}$ <p>В точке А ОУ: <math>T + mg = ma_{\text{ц.с.}}</math> <math>P = m(a_{\text{ц.с.}} - g)</math></p> <p>В точке В ОУ: <math>T - mg = ma_{\text{ц.с.}}</math> <math>P = m(a_{\text{ц.с.}} + g)</math></p>	
<p>4. На один из грузов положили довесок Второй закон Ньютона:</p> $(M + m)\vec{g} + \vec{T}_1 = (M + m)\vec{a}$ $\vec{T}_2 + M\vec{g} = M\vec{a}$ <p>1. ОУ: <math>(M + m)g - T_1 = (M + m)a</math> 2. ОУ: <math>T_2 - Mg = Ma</math></p> <p>Третий закон Ньютона: <math>T_1 = T_2</math> Вес довеска: <math>P_{\downarrow} = m(g - a)</math></p>	

**Импульс тела**  $\vec{p}$  (кг·м/с) — векторная физическая величина, равная произведению массы тела на его скорость:

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

Направление импульса совпадает с направлением скорости  $\vec{p} \uparrow \vec{v}$ , так как  $m > 0$ .

Импульс тела равен нулю, если тело не движется ( $v = 0$ ).

**Реактивное движение** — это движение, которое происходит за счёт отделения от тела с некоторой скоростью какой-либо его части. В отличие от других видов движения реактивное движение позволяет телу двигаться и тормозить в безвоздушном пространстве, достигать первой космической скорости.

Второй закон Ньютона в импульсном виде:  $F_p \Delta t = \Delta mv$ .

**Закон сохранения импульса:** полный импульс замкнутой системы сохраняется.

**Закон сохранения импульса:** *полный импульс замкнутой системы сохраняется.*

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

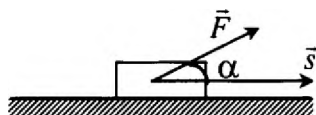
векторная сумма импульсов тел  
до взаимодействия

векторная сумма импульсов тел  
после взаимодействия

Систему называют *замкнутой*, если тела, входящие в неё, взаимодействуют только друг с другом, а влиянием внешних сил можно пренебречь.

Неупругое столкновение с неподвижным телом	$m_1 v_1 = (m_1 + m_2) v$
Неупругое столкновение движущихся тел	$\pm m_1 v_1 \pm m_2 v_2 = \pm (m_1 + m_2) v$
В начальный момент система тел неподвижна	$0 = m_1 v'_1 - m_2 v'_2$
До взаимодействия тела двигались с одинаковой скоростью	$(m_1 + m_2) v = \pm m_1 v'_1 \pm m_2 v'_2$

### Механическая работа



где  $F$  (Н) — модуль силы,

$s$  (м) — модуль перемещения,

$\alpha$  — угол между направлениями силы и перемещения.

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

Единица измерения работы — джоуль

$$1 \text{ Дж} = 1 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

*Условия совершения механической работы*

- На тело действует сила.
- Под действием этой силы тело перемещается.
- $\alpha \neq 90^\circ$

Если тело может совершить механическую работу, то оно обладает *механической энергией*  $E$  (Дж).

Виды механической энергии: кинетическая и потенциальная.

*Кинетическая энергия* — энергия движущихся тел:

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

где  $v$  (м/с) — модуль мгновенной скорости.

**Потенциальная энергия** — энергия взаимодействующих тел.

*Тело поднято над землёй:*

$$E_p = mgh,$$

где  $h$  — высота, определяемая от нулевого уровня (или от нижней точки траектории).

*Упруго деформированное тело:*

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

где  $x$  (м) — деформация, определяемая от положения недеформированного тела (пружины, шнура и т.п.).

**Мощность** — физическая величина, показывающая, какую работу совершает тело за единицу времени (или какую энергию вырабатывает тело за единицу времени).

Обозначение	$N$ (в механике) или $P$ (в других разделах)
Основная формула	$N = \frac{A}{t}$
Единица измерения в СИ	$1 \text{ Вт} = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ с}}$
Мгновенная мощность	$N_{\text{мгн}} = F_{\tau} \cdot v_{\text{мгн}}$

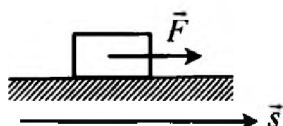
### Коэффициент полезного действия

$$\eta = \frac{A_{\text{полезн}}}{A_{\text{полн}}} \cdot 100\%, \quad \eta = \frac{Q_{\text{н}} - Q_{\text{х}}}{Q_{\text{н}}} 100\%, \quad \eta = \frac{T_{\text{н}} - T_{\text{х}}}{T_{\text{н}}} 100\%$$

где  $Q_{\text{н}}$  (Дж) — полученное количество теплоты;  $Q_{\text{х}}$  — отданное  
 $T_{\text{н}}$  (К) — температура нагревателя;  $T_{\text{х}}$  — холодильника

Устройство	Полезная работа и полная работа (затраченная энергия)	КПД
Неподвижный блок, рычаг	$A_{\text{полезн}} = mgh$ $A_{\text{соверш.}}$	$\eta = \frac{mgh}{A_{\text{соверш.}}} \cdot 100\%$
Наклонная плоскость	$A_{\text{полезн}} = mgh$ $A_{\text{полн}} = F \cdot l$	$\eta = \frac{mgh}{F \cdot l} \cdot 100\%$

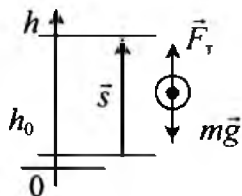
### Работа и изменение кинетической энергии



$$A = \frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2} = \Delta E_k.$$

$v$  — модуль мгновенной скорости.

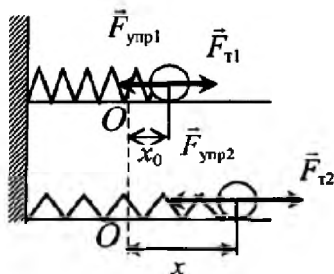
## Работа и изменение потенциальной энергии тела, поднятого над землёй



$$F_{\tau} = mg ; s = h - h_0 ,$$

$$A = mg(h - h_0) = \Delta E_p .$$

## Работа и изменение потенциальной энергии упруго деформированного тела



$$F_{\tau} = F_{\text{упр}} = \frac{kx_0 + kx}{2}$$

$$s = x - x_0$$

$$A = \frac{kx^2}{2} - \frac{kx_0^2}{2} = \Delta E_p$$

**Полная механическая энергия** — это сумма потенциальной и кинетической энергии тела в определенный момент времени:

$$E = E_k + E_p .$$

**Закон сохранения механической энергии:** *полная энергия замкнутой системы сохраняется:*

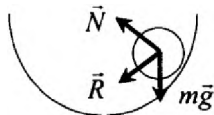
$$E_{k0} + E_{p0} = E_k + E_p .$$

Систему называют *замкнутой*, если тела, входящие в неё, взаимодействуют только друг с другом, а влиянием внешних сил можно пренебречь.

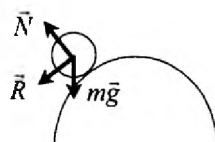
$$\frac{mv_0^2}{2} + mgh_0 = \frac{mv^2}{2} + mgh .$$

## Виды равновесия

**Устойчивое равновесие.** Если тело вывести из устойчивого равновесия, то появляется сила, возвращающая его в положение равновесия. Устойчивому равновесию соответствует минимальное значение потенциальной энергии ( $E_{p\min}$ ).



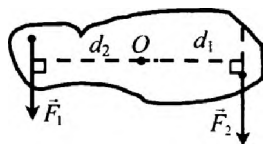
**Неустойчивое равновесие.** Если тело вывести из неустойчивого равновесия, то возникает сила, удаляющая тело от положения равновесия. Неустойчивому равновесию соответствует максимальное значение потенциальной энергии ( $E_{p\max}$ ).



**Момент силы**  $M$  (Н·м) — физическая величина, модуль которой равен произведению модуля силы на плечо силы

$$M = F \cdot d.$$

**Плечо силы**  $d$  (м) — кратчайшее расстояние между осью вращения и линией действия силы.



**Правило моментов:** тело, имеющее неподвижную ось вращения, находится в равновесии, если алгебраическая сумма моментов всех приложенных к телу сил относительно этой оси равна нулю:

$$\Sigma M_i = 0.$$

Или сумма моментов сил, вызывающих вращение тела по часовой стрелке, равна сумме моментов сил, вызывающих вращение тела против часовой стрелки:

$$\Sigma M_{\text{по час. стр.}} = \Sigma M_{\text{пр. час. стр.}}$$

<b>1. Рычаг</b> Даёт выигрыш в силе $\frac{F_1}{F_2} = \frac{d_2}{d_1}$	
<b>2. Неподвижный блок</b> изменяет направление силы $d_1 = d_2; F_1 = F_2$	
<b>3. Подвижный блок</b> даёт выигрыш в силе в 2 раза $d_1 = R; d_2 = 2R$	

**«Золотое правило механики».** При использовании простых механизмов мы выигрываем в силе, но проигрываем в расстоянии, поэтому выигрыша в работе простые механизмы не дают.

Давление твёрдого тела  $p$  (Па):

$$p = \frac{F_{\perp}}{S},$$

где  $F_{\perp}$  — перпендикулярная составляющая силы, действующей на поверхность;  $S$  — площадь поверхности.

$$1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2.$$

Способы увеличения давления: увеличить силу; уменьшить площадь. Давление в твёрдых телах передаётся в том же направлении, в котором действует сила.

**Закон Паскаля:** *давление, производимое на жидкость или газ, передаётся жидкостью или газом во все стороны одинаково.*

Это связано с подвижностью молекул в жидком и газообразном состояниях.

Давление столба жидкости

$$p = \rho_{\text{ж}} g h,$$

где  $\rho_{\text{ж}}$  (кг/м<sup>3</sup>) — плотность жидкости;  $g \approx 10$  (м/с<sup>2</sup>) — ускорение свободного падения;  $h$  (м) — высота столба жидкости (глубина).

Учтите, что высоту  $h$  определяют от поверхности жидкости.

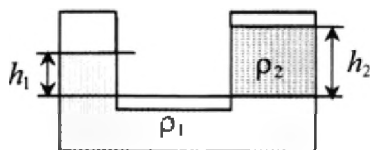
Сила давления жидкости

$$F = p \cdot S$$



**Гидростатический парадокс** (следствие закона Паскаля): давление на дно сосуда определяется **только** плотностью жидкости и высотой столба.

По закону Паскаля на любом горизонтальном уровне



$$p_1 = p_2,$$

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

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

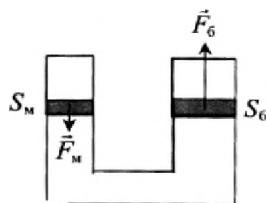
**Вывод:** если в сообщающиеся сосуды налиты разные по плотности жидкости, то выше будет располагаться уровень жидкости с меньшей плотностью.

**Гидравлический пресс** — простой механизм, дающий выигрыш в силе. Он представляет собой сообщающиеся сосуды разного сечения. В основе его действия лежит *закон Паскаля*:

$$p_m = p_6$$

$$\frac{F_m}{S_m} = \frac{F_6}{S_6}$$

$S_m$  — площадь малого поршня;  
 $S_6$  — площадь большого поршня.



Работа поршней (без потерь энергии):  $A_m = A_6$ ,  $F_m h_m = F_6 h_6$

**Атмосферное давление** — давление «воздушного океана», которое также уменьшается с высотой.

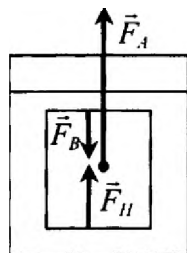
1 мм рт. ст. = 133 Па

Нормальное атмосферное давление  $p_0 = 10^5$  Па .

**Архимедова сила** (выталкивающая сила, подъёмная сила) действует на погружённое в жидкость или газ тело.

Архимедова сила всегда направлена вертикально вверх.

Причина возникновения выталкивающей силы: нижняя грань тела находится на большей глубине, чем верхняя, поэтому давление жидкости снизу больше, чем сверху. Из-за разницы в давлениях возникает выталкивающая сила.



Архимедова сила равна разности сил давления на нижнюю и верхнюю грани:  $F_A = F_H - F_B$ .

Архимедова сила равна разности веса тела в воздухе и веса тела в жидкости:  $F_A = P_{\text{возд}} - P_{\text{ж}}.$

**Закон Архимеда:** выталкивающая сила равна весу вытесненной жидкости или газа:  $F_A = P_{\text{жид.}}$

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

где  $V_{\text{п.ч.}}$  — объём погружённой части тела

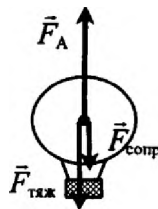
$\rho_{\text{ж}}$  — плотность жидкости

**Воздухоплавание.** Подъёмной силой служит архимедова сила:

$$F_A = \rho_{\text{возд}} V_{\text{ш}} g$$

тело плавает внутри жидкости

$$mg = F_A; \rho_{\text{т}} = \rho_{\text{ж}},$$



тело всплывает  $mg < F_A; \rho_t < \rho_{ж}.$

тело тонет  $mg > F_A; \rho_t > \rho_{ж},$

## Основные положения молекулярно-кинетической теории

1. Все вещества состоят из *молекул* (получены фотографии с помощью электронного микроскопа).


2. Между молекулами есть *промежутки*; при нагревании они увеличиваются, а при охлаждении уменьшаются. (Объём смеси воды и спирта меньше, чем сумма объёмов воды и спирта до соединения.). Исключения: при охлаждении (до 4 °С) в воде промежутки увеличиваются, при нагревании резины — уменьшаются.

3. Молекулы *движутся*. Чем быстрее их движение, тем больше температура вещества, и наоборот. (Диффузия — явление перемещения веществ без постороннего воздействия; броуновское движение — тепловое движение частиц под действием молекул вещества, в котором эти частицы взвешены.)

4. Молекулы *взаимодействуют*. На расстояниях, сравнимых с размерами молекул, заметнее проявляется притяжение, а при уменьшении расстояний — отталкивание. (Пример: склеивание двух плоских стекол, смоченных водой.)

	Твёрдое тело	Жидкость	Газ
Строение			
Расстояния между молекулами	Сравнимо с размером молекул	Чуть больше, чем в твёрдом теле	Многokrратно превышает размеры молекул
Характер движения	Колебательное	Скачкообразное	Хаотическое
Скорости молекул	Малы	Скорее малы	Огромны
Взаимодействие между молекулами	Наибольшее	Меньше, чем у твёрдых тел	Наименьшее



<p>На поверхность воды нанесли каплю масла, объём которой <math>V</math>. На поверхности воды образовалась плёнка толщиной в одну молекулу и площадью <math>S</math></p> 	<p>Диаметр молекулы: <math>d = \frac{V}{S}</math></p> <p>Объём капли: <math>V = \frac{m}{\rho}</math></p> <p>Площадь пятна:</p> $S = \pi R^2 = \frac{\pi D^2}{4}$ $d_{\text{мол}} \approx 10^{-9} \text{ м}; d_{\text{атома}} \approx 10^{-10} \text{ м}$
<p>Относительная атомная масса <math>A_r</math> (а.е.м) указана в таблице химических элементов Д.И. Менделеева</p>	$A_r = \frac{m_0}{\frac{1}{12} m_{\text{ос}}},$ <p>где <math>m_0</math> — масса одного атома, <math>m_{\text{ос}}</math> — масса атома углерода</p>
<p>Относительная молекулярная масса <math>M_r</math> (а.е.м) складывается из относительных атомных масс, входящих в состав молекулы</p>	$M_r = \sum A_r$
<p>Молярная масса <math>M</math> (кг/моль) — масса 1 моль данного вещества</p>	$M = M_r \cdot 10^{-3}$ <p>Помните: <math>\text{H}_2, \text{O}_2, \text{N}_2, \text{Cl}_2</math></p>
<p>Постоянная Авогадро <math>N_A</math> (1/моль) — число частиц в 1 моль вещества</p>	$N_A = 6 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{моль}}$
<p>Масса молекулы <math>m_0</math> (кг)</p>	$m_0 = \frac{M}{N_A}$
<p>Количество вещества <math>\nu</math> (моль) — число частиц, измеренное в относительных единицах (в молях)</p>	$\nu = \frac{N}{N_A} = \frac{m}{M} = \frac{\rho V}{M}$
<p>Двухатомный газ перешёл в атомарное состояние</p>	$\nu_2 = 2\nu_1; M_2 = 0,5M_1$
<p>Плотность <math>\rho</math> (кг/м<sup>3</sup>) — масса 1 м<sup>3</sup> данного вещества (табличная величина)</p>	$\rho = \frac{m}{V} = m_0 n$ <p>Учтите: <math>1 \text{ г/см}^3 \cdot 1000 = 1 \text{ кг/м}^3</math></p>

Число молекул $N_{\text{мол}}$ и атомов $N_{\text{атом}}$	$N_{\text{мол}} = \nu N_A = nV$ ; $N_{\text{атом}} = kN_{\text{мол}}$ , где $k$ — количество атомов в одной молекуле
Концентрация $n$ (1/м <sup>3</sup> ) — число час- тиц в 1 м <sup>3</sup>	$n = \frac{N}{V} = \frac{\rho}{m_0}$
Масса вещества $m$ (кг)	$m = \rho V = \nu M$

**Идеальный газ** — газ, удовлетворяющий трём условиям: 1) молекулы — материальные точки; 2) потенциальной энергией взаимодействия можно пренебречь; 3) столкновения между молекулами являются абсолютно упругими. Реальный газ с малой плотностью можно считать идеальным.

Связь между температурами

$$T = t + 273$$

Шкала Цельсия

$$t (^{\circ}\text{C})$$

Шкала Кельвина

$$T (\text{K})$$

**Основное уравнение МКТ идеального газа** связывает *макропараметры* (давление, объём, температуру, массу) и *микропараметры* (массу молекул, скорость молекул, кинетическую энергию).

<p><b>Давление идеального газа</b> связано с тем, что молекулы газа беспорядочно движутся, сталкиваются друг с другом и со стенками сосуда</p> $p = \frac{1}{3} m_0 n \overline{v^2}$ $p = \frac{1}{3} \rho \overline{v^2}$ $p = \frac{2}{3} n \overline{E_k}$ $p = nkT$ <p><b>Следствия из основного уравнения молекулярно-кинетической теории идеального газа</b></p>	<p><math>R = N_A \cdot k = 8,31 \text{ Дж}/(\text{K} \cdot \text{моль})</math> — универсальная газовая постоянная</p> <p><math>k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж}/\text{K}</math> — постоянная Больцмана</p> <p><math>N_A = 6 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{моль}}</math> — постоянная Авогадро</p> <p><math>p (\text{Па})</math> — давление газа</p> <p><math>m_0 = \frac{M}{N_A} (\text{кг})</math> — масса одной молекулы</p> <p><math>M (\text{кг}/\text{моль})</math> — молярная масса</p> <p><math>n = \frac{N}{V} \left( \frac{1}{\text{м}^3} \right)</math> — концентрация</p> <p><math>N</math> — число молекул</p> <p><math>V (\text{м}^3)</math> — объём</p>
---	--

$$1 \text{ л} = 10^{-3} \text{ м}^3.$$

Температура — мера средней кинетической энергии молекул идеального газа

$$\bar{E}_k = \frac{3}{2} kT$$

$$T = \frac{2\bar{E}_k}{3k}$$

$\rho = \frac{m}{V}$  (кг/м<sup>3</sup>) — плотность вещества  
 $m$  (кг) — масса газа

$\overline{v^2}$  (м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>) — среднее значение квадрата скорости

$\bar{E}_k$  (Дж) — среднее значение кинетической энергии

**Уравнение состояния идеального газа** было открыто экспериментально и носит название **уравнения Клапейрона—Менделеева**. Оно устанавливает математическую зависимость между параметрами идеального газа, находящегося в одном состоянии.

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

**Объединённый газовый закон** (открыт экспериментально): при постоянной массе газа и его неизменной молярной массе отношение произведения давления на объём к его абсолютной температуре остаётся величиной постоянной:

$$\frac{pV}{T} = \text{const} \quad \text{или} \quad \frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$$

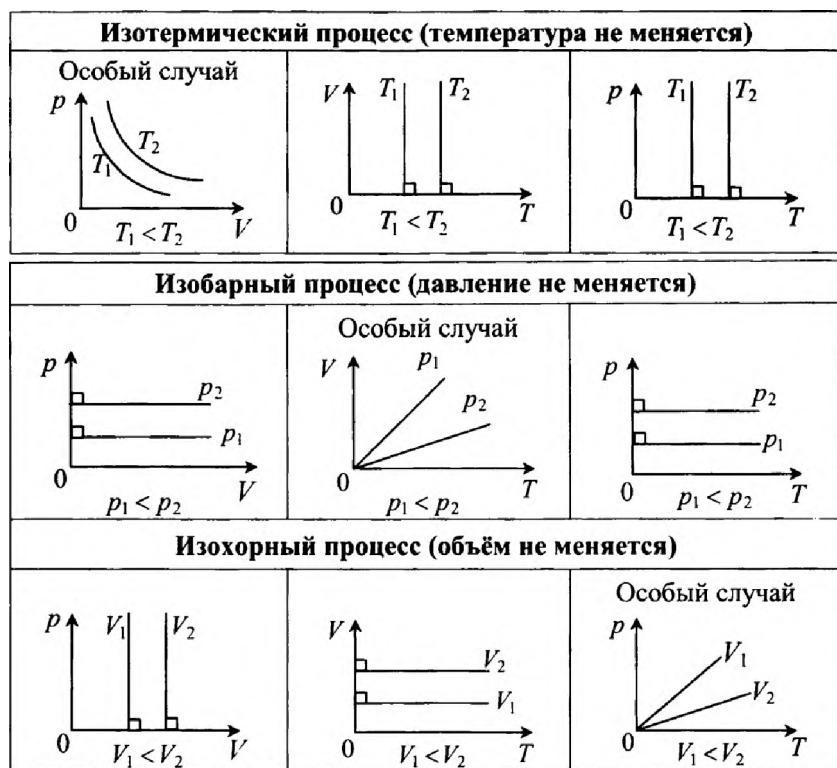
Изотермический процесс $T_1 = T_2$	Изобарный процесс $p_1 = p_2$	Изохорный процесс $V_1 = V_2$
<b>Закон Бойля—Мариотта</b> $p_1 V_1 = p_2 V_2$	<b>Закон Гей-Люссака</b> $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$	<b>Закон Шарля</b> $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$

$$m_1 = m_2 \quad M_1 = M_2$$

**Закон Дальтона** справедлив для смеси газов: *давление смеси газов равно сумме их парциальных давлений*. Например, давление воздуха складывается из давления азота, кислорода, углекислого газа, водяного пара и т.д.

$$p = p'_1 + p'_2 + \dots$$

**Парциальное давление** — давление, которое производил бы данный газ, если бы другие газы отсутствовали.



Если график располагается перпендикулярно некоторой оси, то величина, указанная на ней, сохраняется.

Следует запомнить особые случаи: изотермы в осях  $p, V$  — гиперболы; изобары в осях  $V, T$  — прямые, выходящие из начала координат. Изохоры в осях  $p, T$  — прямые, выходящие из начала координат.

**Испарение** — переход молекул вещества из жидкого состояния в газообразное, причём процесс парообразования происходит только со свободной поверхности жидкости. Испарение бывает при любой температуре, так как всегда найдутся достаточно «быстрые» молекулы,

*Скорость испарения зависит от:*

- 1) температуры жидкости (больше или меньше «быстрых» молекул);
- 2) рода жидкости (сильнее или слабее взаимодействие между молекулами);
- 3) наличия воздушных потоков;
- 4) влажности воздуха;
- 5) площади открытой поверхности.

**Конденсация** — процесс обратный испарению, т.е. молекулы из газообразного состояния переходят в жидкое. В открытом сосуде всегда преобладает испарение, а в герметично закрытом сосуде устанавливается равновесие между этими процессами.

**Динамическое равновесие** — это состояние, при котором число испарившихся за единицу времени молекул равно числу сконденсированных. Пар, находящийся в состоянии динамического равновесия со своей жидкостью, называют *насыщенным*.

**Давление насыщенного пара в изотермическом процессе не зависит от объёма.** При уменьшении объёма пара «лишние» молекулы воды конденсируются, а при увеличении объёма недостаток молекул восполняется за счёт испарения. В итоге через некоторое время снова наступает динамическое равновесие.

**Относительная влажность  $\varphi$  (%)**

$$\varphi = \frac{p}{p_{\text{нас}}(t)} \cdot 100\% = \frac{P}{P_{\text{нас}}(t)} \cdot 100\%,$$

где  $\rho$  (кг/м<sup>3</sup>) — плотность водяного пара,  $\rho_{\text{нас}}(t)$  — плотность насыщенного водяного пара при данной температуре (табличная величина);  $p$  (Па) — парциальное давление водяного пара;  $p_{\text{нас}}(t)$  — давление насыщенного пара при данной температуре (табличная величина).

Измерительный прибор: *психрометр*.

**Помните:** влажность воздуха не бывает больше 100 %.

**Внутренняя энергия** сосредоточена «внутри» вещества и складывается из потенциальной энергии взаимодействующих молекул (или атомов) и кинетической энергии их движения:

$$U = \Sigma E_{k0} + \Sigma E_{p0},$$

где  $\Sigma E_{k0}(v)$  — кинетическая энергия молекул (атомов), которая зависит от скорости их движения. Она изменяется только при изменении температуры. В процессе агрегатных переходов кинетическая энергия молекул остаётся неизменной;

$\Sigma E_{p0}(r)$  — потенциальная энергия молекул, которая зависит от промежутков между молекулами. Она изменяется при изменении температуры и объёма. Например, в процессе агрегатных переходов изменяется именно потенциальная энергия молекул.

## Способы изменения внутренней энергии:

- 1) совершение работы (за счёт трения или ударов);
- 2) испарение (в процессе испарения внутренняя энергия жидкости понижается)
- 3) теплопередача (приведение в соприкосновение с более холодным или более нагретым телом).

**Виды теплопередачи:** теплопроводность, конвекция, излучение.

**Теплопроводность.** При теплопроводности происходит постепенное увеличение скорости движения молекул. Это возможно только благодаря межмолекулярному взаимодействию, поэтому теплопроводность в твёрдых телах происходит быстрее, чем в жидкостях. В газах она осуществляется ещё медленнее. Для сохранения тепла используют пористые материалы, в которых много воздуха. Воздух — это смесь газов, поэтому он плохо проводит тепло.

*Учите:* в вакууме теплопроводность невозможна.

**Конвекция.** При конвекции тёплые слои жидкости или газа поднимаются, а холодные опускаются. Конвекция осуществляется в жидкостях и газах.

*Учите:* в твёрдых телах и в вакууме конвекция невозможна.

*Применение конвекции.* Нагреватели следует располагать внизу, а охлаждающие тела сверху.

**Излучение.** Все нагретые тела излучают энергию. Чем больше нагрето тело, тем сильнее излучение. Теплопередача за счёт излучения возможна в любой среде, в том числе и в вакууме.

*Свойства излучения.* Тёмные поверхности хорошо поглощают излучение, но быстро отдают энергию при охлаждении. Зеркальные и светлые поверхности отражают излучение и медленно остывают.

**Количество теплоты  $Q$  (Дж)** — физическая величина, которая показывает, на сколько изменяется внутренняя энергия вещества в процессе теплопередачи:

**Нагревание и охлаждение вещества**

$$Q = cm(t_k - t_n),$$

где  $(t_k - t_n)$  ( $^{\circ}\text{C}$ , K) — изменение температуры вещества;  $t_n$  ( $^{\circ}\text{C}$ , K) — начальная температура вещества;  $t_k$  ( $^{\circ}\text{C}$ , K) — конечная температура вещества;  $m$  (кг) — масса вещества;  $c$  (Дж/(кг · K)) — удельная теплоёмкость вещества

**Сгорание топлива**

$$Q = q m,$$

где  $q$  (Дж/кг) — удельная теплота сгорания топлива, показывающая, какое количество теплоты выделяется при полном сгорании 1 кг данного вида топлива.

**Плавление** — переход вещества из твёрдого состояния в жидкое. Плавление каждого вещества происходит при определённой температуре, которую называют *температурой плавления*. Всё подводимое тепло идёт на разрушение кристаллической решётки, при этом увеличивается потенциальная энергия молекул. Кинетическая энергия остаётся без изменения и температура в процессе плавления не изменяется. Для расчёта количества теплоты, необходимого для процесса плавления, следует применять формулу:

$$Q = \lambda m,$$

где  $\lambda$  (Дж/кг) — удельная теплота плавления

**Кипение (парообразование)** — переход вещества из жидкого состояния в газообразное. Происходит при определённой температуре, которую называют *температурой кипения*. В отличие от испарения, при кипении процесс парообразования идёт со всего объёма жидкости. Несмотря на то, что к кипящему веществу подводят тепло, температура не изменяется. Все затраты энергии идут на увеличение промежутков между молекулами. Температура кипения зависит от рода вещества и внешнего атмосферного давления. Количество теплоты, необходимое для процесса кипения, вычисляют по формуле:

$$Q = L m,$$

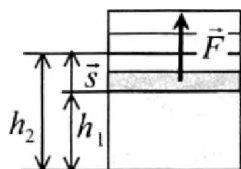
где  $L$  (Дж/кг) — удельная теплота парообразования,

**Конденсация** — процесс, обратный кипению. Происходит при температуре кипения, которая также не изменяется во время всего процесса. Количество теплоты, выделяемое в процессе конденсации:

**Теплообмен.** Уравнение теплового баланса с учётом знаков количества теплоты:

$$Q_{\text{отд}} + Q_{\text{получ}} = 0,$$

**Работа идеального газа.** Если газ, находящийся под поршнем, нагреть, то, расширяясь, он поднимет поршень, т.е. совершит механическую работу.



*Изобарное расширение газа*

$$A' = p(V_2 - V_1) = p\Delta V > 0$$

*Изобарное сжатие газа*

$$A' = p(V_2 - V_1) = p\Delta V < 0.$$

↑  $Q_n$

Запомните: в изохорном процессе  $\Delta V = 0$ ,  $A' = 0$ . 1

**Первое начало термодинамики (закон сохранения энергии в тепловых процессах):** внутренняя энергия идеального газа изменяется двумя способами: за счёт теплопередачи или при совершении работы

$$\pm \Delta U = \pm Q \pm A',$$

где  $+\Delta U$  — внутренняя энергия газа увеличивается,

$-\Delta U$  — внутренняя энергия газа уменьшается,

$+Q$  — газ нагревают, газу передают количество теплоты,

$-Q$  — газ охлаждается, газ отдаёт тепло окружающей среде,

$+A'$  — газ сжимает внешняя сила,

$-A'$  — газ расширяется, газ совершает работу.

Учтите, что знак перед работой показывает, как процесс совершения работы влияет на изменение внутренней энергии газа.

Изменение внутренней энергии — от изменения температуры:

$$\Delta U = \frac{3}{2} \nu R \Delta T.$$

Работа газа — от изменения объёма:  $A' = p \Delta V.$

Изотермический ( $T = \text{const}$ )	$\Delta U = 0, Q = A'$
Изохорный ( $V = \text{const}$ )	$A' = 0, \Delta U = Q$
Изобарное расширение газа ( $p = \text{const}$ )	$\Delta U = Q - p \Delta V$ $\Delta U = Q - \nu R \Delta T$
Адиабатный ( $Q = 0$ ) (или теплоизолированная система)	$Q = 0, \Delta U = A'$

**Электрический заряд  $q$  (Кл)** определяет способность тел участвовать в электромагнитных взаимодействиях. В природе существуют два вида зарядов, которые условно назвали *положительными* и *отрицательными*. Одноимённые заряды отталкиваются, а разноимённые притягиваются.

**Закон сохранения заряда:** алгебраическая сумма зарядов в замкнутой системе сохраняется:

$$\Sigma q_i = \text{const}.$$

Систему называют *замкнутой*, если она не обменивается зарядами с окружающей средой.

Экспериментально доказано, что заряды можно делить, но до определённого предела. Носитель наименьшего электрического заря-



да — отрицательно заряженный электрон:

$$q_e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}; m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}.$$

Модуль любого заряда кратен заряду электрона:

$$q = Nq_e,$$

где  $N = q / q_e$  — избыток электронов.

*Учтите:* в процессе электризации от одного тела к другому переходят **только** электроны. Если у тела избыток электронов, то оно заряжено отрицательно, а если недостаток, то — положительно. *Внимание:* заряженные тела притягивают к себе нейтральные тела и тела с противоположным зарядом. Отталкивание наблюдается **только** между одноимённо заряженными телами.

Вокруг заряженных тел существует особая среда — **электрическое поле**. Именно это поле является посредником в передаче электрического взаимодействия.

*Свойства электрического поля:*

- материально, т.е. существует независимо от нашего сознания;
- возникает вокруг зарядов и обнаруживается по действию на пробный заряд;
- непрерывно распределено в пространстве;
- ослабевает по мере удаления от заряда;
- скорость распространения электрического поля в вакууме равна скорости света  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ .

**Закон Кулона** — основной закон электростатики был открыт экспериментально в 1785 г.: *два неподвижных точечных заряда в вакууме взаимодействуют друг с другом с силой прямо пропорциональной произведению модулей зарядов и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними:*

$$F_k = \frac{k |q_1| \cdot |q_2|}{r^2},$$

где  $|q_1|$  (Кл) и  $|q_2|$  (Кл) — модули зарядов,  $r$  (м) — расстояние между зарядами,  $k$  — коэффициент пропорциональности, который численно равен силе взаимодействия между двумя точечными зарядами по 1 Кл, находящимися на расстоянии 1 м друг от друга:

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

$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}^2 / (\text{Н} \cdot \text{м}^2)$  — электрическая постоянная.

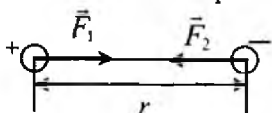
Закон Кулона в среде:

$$F_K = \frac{k|q_1| \cdot |q_2|}{\epsilon r^2},$$

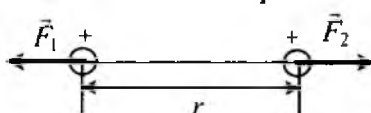
где  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость (табличная величина, показывающая, во сколько раз электрическое взаимодействие в среде уменьшается по сравнению с вакуумом).

Направление силы Кулона зависит от знаков зарядов.

Взаимное притяжение  
разноимённых зарядов:



Взаимное отталкивание  
одноимённых зарядов:



**Напряжённость  $\vec{E}$**  ( $\text{Н/Кл} = \text{В/м}$ ) — силовая характеристика электрического поля, численно равная электрической силе, действующей на единичный положительный заряд:

где  $q_0$  — пробный заряд.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_K}{q_0},$$

Направление вектора напряжённости совпадает с направлением силы Кулона, если пробный заряд положительный:  $q_0 > 0, \vec{E} \uparrow \vec{F}_K$ .

**Силовые линии** — линии, касательные к которым совпадают с вектором напряжённости.

- Направление силовой линии совпадает с направлением вектора напряжённости.
- Чем гуще силовые линии, тем сильнее электрическое поле.
- Линии напряжённости начинаются на положительных зарядах, а заканчиваются на отрицательных или на бесконечности.
- Если силовые линии поля параллельны, то поле называют однородным.

**Потенциальная энергия взаимодействия двух зарядов  $W$**  (Дж)

В вакууме

$$W = \frac{k(\pm q_1)(\pm q_2)}{r},$$

в среде

$$W = \frac{k(\pm q_1)(\pm q_2)}{\epsilon r}.$$

**Потенциал  $\phi$**  (В) — энергетическая характеристика электрического поля:

$$\phi = \frac{W_p}{q_0},$$

где  $q_0$  — пробный заряд.

Потенциал — скалярная физическая величина. Знак потенциала зависит от знака заряда, создающего поле.

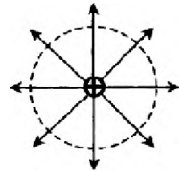
Значение потенциала зависит от выбора нулевого уровня для отсчёта потенциальной энергии, а разность потенциалов (напряжение  $U$  (В)) — от выбора нулевого уровня не зависит:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{12}}{q},$$

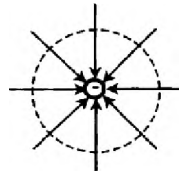
где  $A_{12}$  (Дж) — работа электрических сил по перемещению заряда из точки 1 в точку 2.

**Эквипотенциальные поверхности** — это поверхности, имеющие одинаковый потенциал. Они равноудалены от заряженных тел и обычно повторяют их форму. Эквипотенциальные поверхности перпендикулярны силовым линиям.

Положительный заряд  $+Q$



Отрицательный заряд  $-Q$



**Силовые линии:** у положительного заряда силовые линии направлены по радиальным линиям от заряда; у отрицательного заряда — по радиальным линиям к заряду.

**Модуль напряжённости:**

1) не зависит от значения пробного заряда  $q_0$

$$E = \frac{F_K}{q_0} = \frac{kQq_0}{r^2 q_0} = \frac{kQ}{r^2},$$

где  $r$  — расстояние от точечного заряда до изучаемой точки;

2) в вакууме

$$E = \frac{kQ}{r^2};$$

3) в среде

$$E_{\text{ср.}} = \frac{E_{\text{вак}}}{\varepsilon} = \frac{kQ}{\varepsilon r^2}.$$

Сила Кулона

$$\vec{F} = q\vec{E}.$$

**Потенциал:** 1) не зависит от значения пробного заряда  $q_0$

$$\varphi = \frac{W_p}{q_0} = \pm \frac{kQq_0}{rq_0} = \pm \frac{kQ}{r};$$

2) в вакууме

$$\varphi = \pm \frac{kQ}{r};$$

3) в среде

$$\varphi = \pm \frac{kQ}{\varepsilon r}.$$

**Учитите:** знак потенциала зависит от знака заряда, создающего поле. Работа электрического поля по перемещению точечного заряда:

$$A_{12} = \pm q(\varphi_1 - \varphi_2)$$

**Принцип суперпозиции сил.** Результирующая (равнодействующая) сила равна векторной сумме всех сил, действующих на тело:

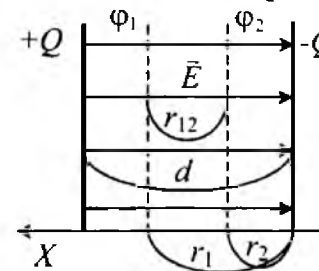
$$\vec{R} = \Sigma \vec{F}_i, \text{ где } F_i = \frac{kq_i q}{r_i^2}.$$

$$\vec{E} = \Sigma \vec{E}_i, \text{ где } E_i = \frac{kq_i}{r_i^2}.$$

Для определения полной энергии надо сложить потенциальные энергии всех пар зарядов:

$$W_p = \Sigma W_{ip}, \text{ где } W_{ip} = \pm \frac{kq_i q_n}{r_i}.$$

**Однородное электростатическое поле**



Потенциал  $\varphi = Er$ .

Разность потенциалов  $\varphi_1 - \varphi_2 = Er_{12}$ .

Напряжение между пластинами  $U = Ed$ .

Сила Кулона  $F = qE = \frac{qU}{d}$ .

Основные формулы для расчёта работы:

$$A = F_K s \cos \alpha = \pm qEs \cos \alpha,$$

$$A = \pm qE(r_0 - r) = qEr_0 - qEr,$$

где  $E$  (В/м; Н/Кл) — модуль напряжённости электрического поля,  $U$  (В) — разность потенциалов (напряжение) между пластинами,  $d$  (м) — расстояние между пластинами,  $\pm q$  (Кл) — заряд, переносимый полем,  $s$  (м) — модуль перемещения заряда,  $\alpha$  — угол между силой Кулона и перемещением,  $r_0$  (м) — начальное положение заряда,  $r$  (м) — конечное положение заряда.

Работа и разность потенциалов:

$$A = \pm q(\varphi_1 - \varphi_2) = \pm qU_{12},$$

где  $\varphi_1$  (В) — начальный потенциал,  $\varphi_2$  (В) — конечный потенциал. Работа и изменение кинетической энергии:

$$A = \frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2} = \Delta E_k.$$

Работа и изменение потенциальной энергии:

$$A = -(qEr - qEr_0) = -\Delta W_p.$$

Учитывайте знак переносимого заряда!

**Електроёмкость конденсатора.** Електроёмкость плоского конденсатора  $C$  (Ф):

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

где  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}^2/(\text{Н} \cdot \text{м}^2)$ ;  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость среды,  $S$  ( $\text{м}^2$ ) — площадь каждой пластины.

*Учтите:* у воздушного конденсатора  $\epsilon = 1$ .

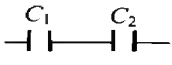
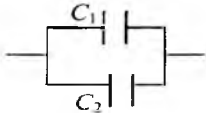
Електроёмкость конденсатора, заряд и напряжение

$$C = \frac{Q}{U} \text{ или } C = \frac{q}{U}.$$

*Помните:* електроёмкость конденсатора зависит только от параметров  $S, d, \epsilon$  и не зависит от заряда  $Q$  ( $q$ ) и напряжения  $U$ .

**Энергия конденсатора  $W$  (Дж):**

$$W = \frac{q^2}{2C} = \frac{CU^2}{2}$$

	Последовательное соединение	Параллельное соединение
Схема		
Напряжение	$U = U_1 + U_2$	$U = U_1 = U_2$
Заряд	$q = q_1 = q_2$	$q = q_1 + q_2$
Електроёмкость	$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$	$C = C_1 + C_2$

**Электрический ток** — направленное движение заряженных частиц под действием внешнего электрического поля.

*Условия существования электрического тока:*

- 1) наличие заряженных частиц;
- 2) электрическое поле (создаётся источниками тока).

*Носители электрического тока в различных средах:*

- в металлах — свободные электроны;
- в электролитах — положительные и отрицательные ионы;
- в газах — ионы и электроны;
- в полупроводниках — электроны и дырки;
- в вакууме — электроны.

По проводам перемещаются отрицательные электроны, т.е. ток идёт от «-» к «+» источника. Направление движения электронов называют *действительным*. Но исторически в науке принято *условное* направление тока: от «+» источника к «-».

Источник тока 	Лампа 	Ключ 
Соединительный провод 	Пересечение соединительных проводов 	Резистор 
Амперметр 	Вольтметр 	Конденсатор 

**Сила тока**  $I$  (А) показывает, какой заряд  $q$  проходит через поперечное сечение проводника за 1 с:

$$I = \frac{q}{t} = \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{Nq_e}{t},$$

где  $N$  — число электронов;  $q_e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл — заряд электрона;  $t$  (с) — время.

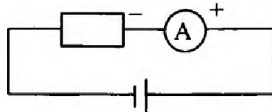
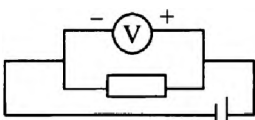
**Сопротивление**  $R$  (Ом) металлов характеризует тормозящее действие положительных ионов кристаллической решётки на движение свободных электронов:

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

где  $\rho$  (Ом · м) — *удельное сопротивление*, показывающее, какое сопротивление имеет проводник длиной 1 м площадью поперечного сечения 1 м<sup>2</sup>, изготовленный из определенного материала;  $l$  (м) — длина проводника;  $S$  (м<sup>2</sup>) — площадь сечения.

**Напряжение**  $U$  (В) характеризует работу электрического поля по перемещению положительного заряда:

$$U = \frac{A}{q}.$$

	Амперметр измеряет силу тока, включается в цепь последовательно, соблюдая полярность	Вольтметр измеряет напряжение, включается в цепь параллельно, соблюдая полярность
Схема включения		

**Закон Ома для участка цепи:** сила тока в участке цепи прямо пропорциональна напряжению на концах этого участка и обратно

пропорциональна его сопротивлению.

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

	Последовательное соединение	Параллельное соединение
Схема		
Полная сила тока	$I = I_1 = I_2$	$I = I_1 + I_2$
Полное напряжение	$U = U_1 + U_2$	$U = U_1 = U_2$
Полное сопротивление	$R = R_1 + R_2$	$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$
Два резистора	$R = R_1 + R_2$	$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$
$n$ одинаковых резисторов	$R = nR_0$	$R = \frac{R_0}{n}$

**Полная цепь** содержит источник тока.

Сторонние силы — это силы любой природы (кроме электрической), которые разделяют заряды внутри источника тока.

Виды сторонних сил: механические, магнитные, химические, световые, тепловые.

**Электродвижущая сила  $\mathcal{E}$  (В)** характеризует работу сторонних сил  $A_{\text{ст}}$  (Дж) по перемещению зарядов  $q$  (Кл) внутри источника:

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

Учтите, что сторонние силы переносят положительные заряды внутри источника от «-» к «+».

**Закон Ома для полной цепи:**

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

где  $R$  (Ом) — **полное** сопротивление внешней цепи,  $r$  (Ом) — внутреннее сопротивление источника.

Сила тока короткого замыкания ( $R \rightarrow 0$ ):

Напряжение на внешней цепи (напряжение на клеммах источника, падение напряжения на внешней цепи):

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

Работа и энергия электрического тока:

$$A = W = qU = IU t = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t.$$

**Закон Джоуля–Ленца:**

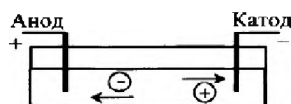
$$Q = I^2 R t.$$

Мощность  $P$  (Вт) — это работа, производимая за 1 с:

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

Объём проводника цилиндрической формы	$V = Sl$
Масса проводника цилиндрической формы	$m = \rho V = \rho Sl$
Количество теплоты и изменение температуры	$Q = cm\Delta T$

**Электролиты** — жидкости, проводящие электрический ток. К ним относят растворы солей, щелочей и кислот.

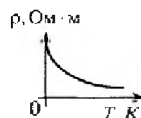
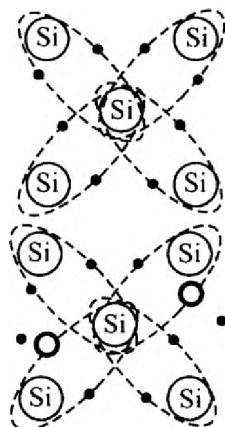


Положительные ионы движутся к катоду, а отрицательные — к аноду.

**Собственная проводимость полупроводников** — электронно-дырочная. При низкой температуре все электроны участвуют в создании ковалентных связей, свободных электронов нет. Полупроводник ведёт себя как диэлектрик.

При повышении температуры или облучении полупроводников часть ковалентных связей разрушается, и появляются свободные электроны. На месте разрушенной связи возникает электронная вакансия — дырка. Она также перемещается по кристаллу, но ведёт себя подобно положительной частице.

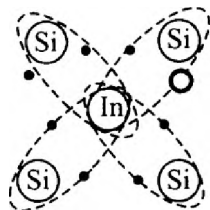
Зависимость удельного сопротивления полупроводников от температуры и внешнего излучения.



**Примесная проводимость полупроводников.** Донорные примеси — элементы 5-й группы таблицы химических элементов Д.И. Менделеева. Только 4 из 5 валентных электрона участвуют в создании ковалентных связей, остальные сразу становятся свободными. Полупроводник, основными носителями в котором являются отрицательные электроны, относится к полупроводникам *n-типа*.



*Акцепторные примеси* — элементы 3-й группы таблицы химических элементов Д.И. Менделеева. Три валентных электрона устанавливают ковалентные связи, а на месте четвёртой появляется дырка. Полупроводник с положительными носителями относится к полупроводникам *p-типа*.



**Термисторы** — приборы, сопротивление которых изменяется при нагревании. Они позволяют определять малые изменения температуры.

**Фоторезисторы** чувствительны к изменению освещённости.

**Полупроводниковый диод** — соединение полупроводников двух типов. Обладает односторонней проводимостью.

**Электрический ток в вакууме.** Получение основных носителей происходит за счёт термоэлектронной эмиссии.

*Термоэлектронная эмиссия* — процесс испускания электронов при нагревании катода до высокой температуры.

*Свойства электронных пучков:*

- вызывают нагрев тел,
- при торможении возникает рентгеновское излучение,
- при попадании на некоторые вещества (люминофоры) вызывают их свечение,
- направление электронов может изменяться под действием электрического или магнитного полей.

**Электрический ток в газах** называют разрядом. Обычно газы состоят из нейтральных молекул, поэтому являются диэлектриками. Чтобы появились носители электрического заряда, необходима затрата энергии.

**Несамостоятельный разряд.** При нагреве газа или его облучении от атомов могут отделяться электроны, и атомы превращаются в положительные ионы.



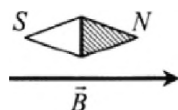
**Самостоятельный разряд.** В газах при столкновении молекул может освободиться хотя бы один электрон. Если он попадёт в электрическое поле, то начнёт двигаться с ускорением. Сталкиваясь с нейтральным атомом газа, ускоренный электрон может «выбить» из него другой электрон, превратив сам атом в положительный ион. Электроны будут и дальше ускоряться, разрушая атомы. Ионы создают ток в противоположном направлении. Таким образом, электрический ток в газах создаётся электронами и ионами.

## МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

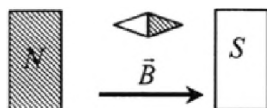
**Вектор магнитной индукции  $\vec{B}$  (Тл)** — силовая характеристика магнитного поля.

Модуль вектора магнитной индукции — физическая величина, равная отношению максимальной силы, действующей со стороны магнитного поля на отрезок проводника с током, к произведению силы тока и длины проводника:  $B = \frac{F_{A\max}}{Il}$ .

1) направление вектора магнитной индукции  $\vec{B}$  совпадает с направлением на север магнитной стрелки;



2) в пространстве между полюсами постоянного магнита вектор магнитной индукции  $\vec{B}$  выходит из северного полюса.



1) если по витку ток идёт против часовой стрелки, то вектор магнитной индукции  $\vec{B}$  направлен вверх;



2) если ток идёт по часовой стрелке, то вектор магнитной индукции  $\vec{B}$  направлен вниз.

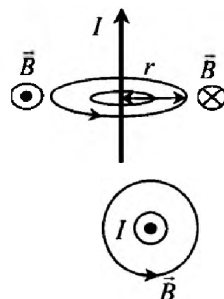
На нас $\perp$ плоскости чертежа	От нас $\perp$ плоскости чертежа

**Линии магнитной индукции** — линии, касательные к которым в любой точке пространства совпадают с направлением вектора магнитной индукции. Чем гуще линии магнитной индукции, тем сильнее поле. Направление вектора магнитной индукции определяется *правилом буравчика*.

## Магнитное поле прямолинейного тока

1. Линии магнитной индукции представляют собой концентрические окружности, лежащие в плоскости, перпендикулярной проводнику. Центр окружностей совпадает с осью проводника.

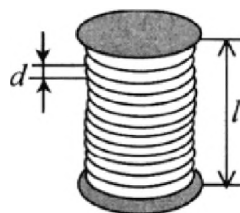
2. Если ток идёт вверх, то силовые линии направлены против часовой стрелки; если вниз, то по часовой стрелке.



Вид сверху

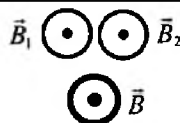
## Магнитное поле электромагнита (соленоида)

1. Линии магнитной индукции являются замкнутыми, причём внутри соленоида они располагаются параллельно друг другу. Поле внутри соленоида *однородно* ( $N = \frac{l}{d}$  — число витков,  $l$  — длина соленоида,  $d$  — диаметр проволоки).



2. Если ток по виткам соленоида идёт против часовой стрелки, то вектор магнитной индукции  $\vec{B}$  внутри соленоида направлен вверх; если по часовой стрелке, то вниз.

**Сложение векторов магнитной индукции, направленных вдоль одной прямой**

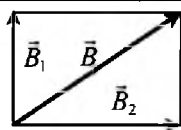


Если  $\vec{B}_1 \uparrow \vec{B}_2$ , то  
 $B = B_1 + B_2$



Если  $\vec{B}_1 \uparrow \vec{B}_2$ ,  $B_1 > B_2$ , то  
 $B = |B_1 - B_2|$

**Сложение векторов магнитной индукции перпендикулярных друг другу**



Если  $\vec{B}_1 \perp \vec{B}_2$ , то по теореме Пифагора  
 $B = \sqrt{B_1^2 + B_2^2}$

**Сила Ампера** — сила, которая действует на проводник с током в магнитном поле:

$$F_A = BIl \sin \alpha,$$

где  $B$  (Тл) — модуль вектора магнитной индукции;  $I$  (А) — сила тока;  $l$  (м) — длина проводника;  $\alpha$  — угол между условным направлением тока и вектором магнитной индукции.

**Внимание.** Сила Ампера не действует на проводник, если он располагается параллельно силовым линиям магнитного поля, т.к.  $\sin \alpha = 0$ .

**Сила Лоренца** — сила, действующая на движущуюся заряженную частицу в магнитном поле.

Модуль силы Лоренца:

$$F_L = qvB \sin \alpha.$$

**Внимание.** Сила Лоренца не действует:

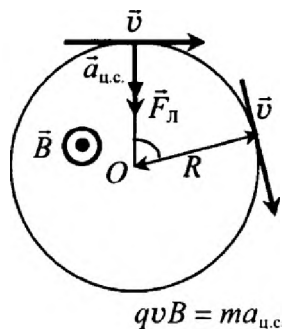
- 1) на нейтральные частицы (нейтрон, атом, молекулу, фотон);
- 2) на неподвижные частицы;
- 3) на частицы, скорость которых параллельна направлению силовых линий.

**Направление силы Лоренца** определяется по правилу левой руки:

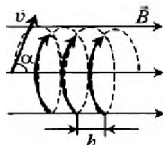
- 1) четыре пальца расположить по направлению скорости положительно заряженной частицы (для отрицательной частицы меняем направление руки на противоположное);
- 2) вектор магнитной индукции входит в ладонь;
- 3) большой палец укажет направление силы Лоренца.

1. Если скорость заряженной частицы параллельна вектору магнитной индукции ( $\vec{v} \parallel \vec{B}$ ), то  $\sin \alpha = 0$ . Следовательно, сила Лоренца и ускорение равны нулю. Движение частицы равномерное и прямолинейное.

2. Если скорость заряженной частицы перпендикулярна вектору магнитной индукции ( $\vec{v} \perp \vec{B}$ ), то сила Лоренца «закручивает» частицу, сообщает ей центростремительное ускорение. Происходит движение по окружности с постоянной по модулю скоростью.



Если скорость заряженной частицы  $\vec{v}$  направлена под углом  $\alpha$  к вектору магнитной индукции  $\vec{B}$ , то заряженная частица движется по спирали.



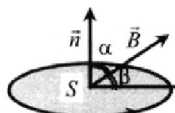
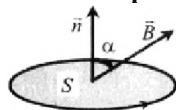
Электростатическое поле	Вихревое электрическое поле	Магнитное поле
Где возникает?		
В пространстве вокруг неподвижного заряда	Порождается переменным магнитным полем	В пространстве вокруг движущихся зарядов
Как обнаружить?		
По действию на пробный неподвижный электрический заряд	По действию на пробный неподвижный электрический заряд	По действию на движущийся заряд или на магнитную стрелку
Силовые линии		
Силовые линии начинаются на положительных зарядах и заканчиваются на отрицательных	Силовые линии замкнуты	Силовые линии замкнуты
Характер поля		
Потенциально, т.е. работа не зависит от вида траектории и по замкнутому контуру равна нулю	Вихревое, т.е. работа поля по замкнутому контуру не равна нулю	Вихревое, т.е. работа поля по замкнутому контуру не равна нулю

В природе существует единое *электромагнитное поле*.

### Магнитный поток

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

где  $\Phi$  (Вб) — магнитный поток,  $B$  (Тл) — модуль вектора магнитной индукции,  $S$  (м<sup>2</sup>) — площадь, ограниченная контуром,  $\alpha$  — угол между вектором  $\vec{B}$  и положительной нормалью к контуру  $\vec{n}$ . Направление положительной нормали определяется *правилом буравчика*.



**Внимание.** Очень часто в условии задачи даётся информация о значении угла между плоскостью контура и вектором магнитной индукции  $\beta$ , тогда  $\alpha = 90^\circ - \beta$

Магнитный поток вращающейся рамки ( $N$  витков):

$$\Phi = NSB \cos(\omega t).$$

Магнитный поток  $\Phi$  и индуктивность  $L$  проводника:

$$\Phi = LI, \quad N\Phi = LI.$$

Индуктивность  $L$  (Гн) характеризует способность проводника создавать магнитный поток.

Индуктивность — мера инертности электрической цепи.

**Правило Ленца:** в замкнутом проводящем контуре возникает индукционный ток такого направления, что созданное им магнитное поле препятствует изменению магнитного потока, в результате которого этот ток возник. Таким образом, индукционное магнитное поле препятствует изменению внешнего магнитного поля.

ЭДС индукции равна скорости изменения магнитного потока, взятой со знаком минус (следствие правила Ленца).

$$\begin{aligned} &\text{Для одного витка} \\ \mathcal{E}_i &= - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = \frac{\Phi_0 - \Phi}{\Delta t} \\ \mathcal{E}_i &= BS\omega \sin(\omega t) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\text{Для } N \text{ витков} \\ \mathcal{E}_i &= -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \end{aligned}$$

ЭДС индукции в движущихся проводниках:

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

где  $\alpha$  - угол между векторами  $\vec{B}$  и  $\vec{v}$

ЭДС индукции прямо пропорциональна скорости изменения силы тока, взятой со знаком минус:

ЭДС индукции и индуктивность

$$\mathcal{E}_i = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} = L \frac{I_0 - I}{\Delta t}$$

Магнитный поток  
и индуктивность  
 $N\Phi = LI$

Явление возникновения ЭДС индукции в электрической цепи в результате изменения силы тока в этой цепи называют **самоиндукцией**.

В соответствии с правилом Ленца ЭДС самоиндукции препятствует нарастанию силы тока при включении и убыванию силы тока при выключении цепи. Индуктивность аналогична массе, т.е. является мерой инертности электрической цепи:

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

Энергия магнитного поля:  $W_m = \frac{LI^2}{2}.$

## Свободные колебания

**Механические колебания** — это процессы в механических системах, в которых периодически изменяются координата, скорость, ускорение и сила

**Электромагнитные колебания** — процессы в электрических цепях, в которых периодически изменяются заряд, сила тока, напряжение и ЭДС

2. Свободные механические колебания из-за трения являются затухающими.

2. Свободные электромагнитные колебания затухают из-за сопротивления.

## Закон гармонических механических колебаний:

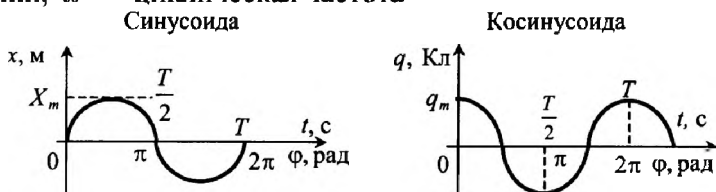
$$x = X_m \cos(\omega t + \varphi_0) \text{ или } x = X_m \sin(\omega t + \varphi_0),$$

где  $x$  — мгновенное значение смещения тела от положения равновесия,  $X_m$  — амплитуда колебаний,  $\varphi = \omega t + \varphi_0$  — фаза колебаний,  $\varphi_0$  — начальная фаза колебаний,  $\omega$  — циклическая частота.

## Закон гармонических электромагнитных колебаний:

$$q = q_m \sin(\omega t + \varphi_0) \text{ или } q = q_m \cos(\omega t + \varphi_0),$$

где  $q$  — мгновенное значение заряда на конденсаторе,  $q_m$  — амплитуда заряда,  $\varphi = \omega t + \varphi_0$  — фаза колебаний,  $\varphi_0$  — начальная фаза колебаний,  $\omega$  — циклическая частота



Маятником называют тело, которое может совершать колебания под действием силы тяжести.

### Математический маятник

Период (с)	$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$	l - длина (м) $g \approx 9.8 \text{ м/с}^2$
------------	------------------------------	--

### Пружинный маятник

Период	$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$	m - масса груза (кг) k - жесткость пружины (Н/м)
Закон Гука	$F_{\text{упр}} = kx$ , где $x = \Delta l =  l - l_0 $ — деформация пружины	

### Электрический контур

Период	$T = 2\pi\sqrt{LC}$
L - индуктивность (Гн)    C - емкость (Ф)	

Пружинный маятник	Электрический контур
Через четверть периода потенциальная энергия перешла в кинетическую. Затем опять перейдет в потенциальную ( $T/2$ ), потом в кинетическую ( $3T/4$ ), снова	Через четверть периода электрическая энергия перешла в магнитную. Затем опять перейдет в электрическую ( $T/2$ ), потом в магнитную ( $3T/4$ ), снова в электрическую

ва в потенциальную ( $T$ ). Процесс происходил бы бесконечно долго, если бы не трение

( $T$ ). Процесс происходил бы бесконечно долго, если бы не было сопротивления

### Закон сохранения энергии

Если трение в системе мало ( $F_{\text{тр}} \rightarrow 0$ ), то

$$E_{\text{pm}} = E_p + E_k = E_{\text{km}}$$

$$\frac{kX_m^2}{2} = \frac{kx^2}{2} + \frac{mv^2}{2} = \frac{mv_m^2}{2}$$

Если сопротивление цепи мало ( $R \rightarrow 0$ ), то

$$W_{\text{im}} = W_s + W_m = W_{\text{mm}}$$

$$\frac{q_m^2}{2C} = \frac{q^2}{2C} + \frac{Li^2}{2} = \frac{LI_m^2}{2}$$

или 
$$\frac{CU_m^2}{2} = \frac{Cu^2}{2} + \frac{Li^2}{2} = \frac{LI_m^2}{2}$$

Работа силы трения приводит к тому, что часть механической энергии переходит во внутреннюю, и колебания затухают

$$E_0 = E + Q$$

Сопротивление приводит к тому, что часть электрической энергии переходит во внутреннюю, и колебания затухают

$$W_0 = W + Q$$

Учитите:  $T_{\text{энергии}} = \frac{T_{\text{колебаний}}}{2}$ ;  $\nu_{\text{энергии}} = 2\nu_{\text{колебаний}}$

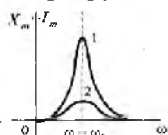
**Вынужденные механические колебания** происходят под действием внешней периодически изменяющейся силы

**Вынужденные электромагнитные колебания** происходят под действием внешней периодически изменяющейся ЭДС

**Резонанс** — явление резкого возрастания амплитуды колебаний, которое происходит при совпадении частоты вынуждающей силы и собственной частоты колебательной системы

**Резонанс** — явление резкого возрастания амплитуды силы тока, которое происходит при совпадении частоты внешнего переменного напряжения и собственной частоты колебательного контура

Резонанс в механических системах может привести к разрушению



Резонанс может привести к перегреву электрических цепей, но в радиосвязи позволяет настроить приёмник на частоту передающей станции

**Переменный электрический ток** — пример вынужденных электромагнитных колебаний. Если мощность переменного тока равна мощности постоянного тока, то говорят о *действующем* значении переменного тока.

Действующее (эффективное) значение силы тока:

$$I_{\delta} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}. \quad I_m - \text{амплитудное значение}$$

Действующее (эффективное) значение напряжения:

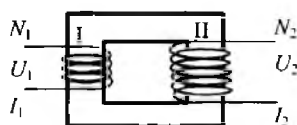
$$U_{\delta} = \frac{U_m}{\sqrt{2}}. \quad U_m - \text{амплитудное значение}$$

Закон Ома для действующих значений:  $I_{\delta} = \frac{U_{\delta}}{R}$ .

Закон Джоуля–Ленца:  $Q = I_{\delta}^2 R t$   $Q$  - количество теплоты (Дж)

Сопротивление	Схема	Закон Ома
Активное или омическое сопротивление $R$		$I_m = \frac{U_m}{R}$
Ёмкостное сопротивление $X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi\nu C}$		$I_m = \frac{U_m}{X_C}$
Индуктивное сопротивление $X_L = \omega L = 2\pi\nu L$		$I_m = \frac{U_m}{X_L}$
Полное сопротивление при последовательном соединении $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$		$I_m = \frac{U_m}{Z}$ Резонанс бывает, если $X_C = X_L$

**Трансформатор** — устройство, преобразующее силу переменного тока и его напряжение.



1. Первичная катушка I подключается в сеть.
2. Ко вторичной катушке II подключают нагрузку.
3. Стальной сердечник изготовлен из наборных пластин.



Закон рабочего хода трансформатора:  $\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_2}{I_1}$ ,  $N$  - число витков

Коэффициент трансформации:  $k = \frac{U_1}{U_2}$ .

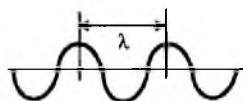
Повышающий трансформатор  $k < 1$ , а понижающий трансформатор  $k > 1$ .

КПД трансформатора  $\eta = \frac{U_2 I_2}{U_1 I_1} \cdot 100\%$ .

## Волны

Длина волны  $\lambda$  (м)

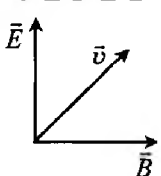
• Расстояние, на которое распространится волна за время одного полного колебания частицы (за период).



- Расстояние между двумя ближайшими «горбами» или «впадинами».
- Кратчайшее расстояние между точками, колеблющимися в фазе.

Механические волны	Электромагнитные волны
Если одна частица среды приходит в колебательное движение, то благодаря силам взаимодействия соседние с ней частицы также начнут колебаться	Ускоренно движущийся заряд создаёт переменный ток, вокруг которого возникает переменное магнитное поле. Оно порождает переменное электрическое поле, которое приводит к возникновению переменного магнитного поля и т.д.

### Виды волн

В <i>поперечных</i> волнах направление колебания частиц ( $\vec{v}_\kappa$ ) перпендикулярно направлению распространения волны ( $\vec{v}_\phi$ ): $\vec{v}_\kappa \perp \vec{v}_\phi$ (пример: волны на воде) В <i>продольных</i> волнах направление колебания частиц параллельно направлению распространения волны: $\vec{v}_\kappa \parallel \vec{v}_\phi$ (пример: звуковые волны)	Электромагнитные волны относятся к <i>поперечным</i> волнам: $\vec{v} \perp \vec{B} \perp \vec{E}$ 
---	---

Механические волны быстрее всего распространяются в твёрдых средах, медленнее в жидких и ещё медленнее в газах Учтите: механические волны в вакууме не распространяются	Электромагнитные волны имеют наибольшую скорость в вакууме, равную скорости света $c = 3 \cdot 10^8$ м/с
--	---

Длина волны	
$\lambda = v \cdot T = \frac{v}{\nu} = \frac{2\pi v}{\omega}$	В вакууме $\lambda = c \cdot T = \frac{c}{\nu} = c2\pi\sqrt{LC}$
Расстояние от источника до наблюдателя	
$l = v \cdot t,$ где $v = \frac{\lambda}{T} = \lambda \nu$ — скорость волны $t$ — время движения волны от источника колебаний до наблюдателя	$l = c \cdot t,$ где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с
Отражение волн	
<b>Эхо</b> — отражение звуковых волн от преграды. Расстояние до преграды $l = v_{\text{зв}} \cdot \frac{t}{2},$ $t$ — время движения волны от источника и обратно Скорость звука в воздухе $\approx 330$ м/с	<b>Радиолокация</b> — способ обнаружения объекта с помощью радиоволн. Расстояние до объекта $l = c \cdot \frac{t}{2}$

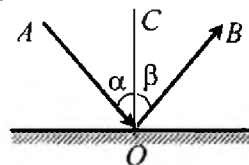
## Законы геометрической оптики

*Луч света* — линия, вдоль которой распространяется световая энергия.

**Закон прямолинейного распространения света** выполняется в однородной прозрачной среде: *свет в однородной прозрачной среде распространяется прямолинейно.*

Закон прямолинейного распространения света объясняет образование тени и полутени, солнечное и лунное затмения.

**Закон отражения** выполняется, если на пути светового луча встретится плоское зеркало: *падающий луч АО, отражённый луч ОВ и перпендикуляр ОС, восстановленный в точке падения,*

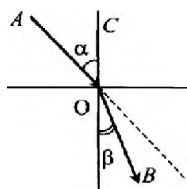


*лежат в одной плоскости. Угол падения  $\alpha$  равен углу отражения  $\beta$ .*

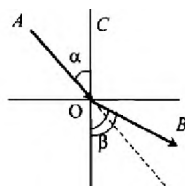
**Закон преломления** выполняется, если на пути светового луча встречается граница двух прозрачных сред: *падающий луч АО, преломлённый луч ОВ и перпендикуляр к границе двух сред ОС лежат в одной плоскости.*

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}, \quad n - \text{показатель преломления среды относительно вакуума}$$

$$n_1 < n_2$$



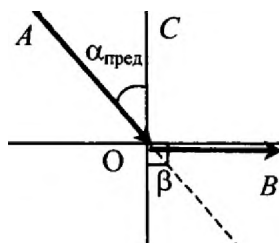
$$n_1 > n_2$$



Если луч переходит из оптически менее плотной среды в оптически более плотную (левый рисунок), то он отклоняется к перпендикуляру и  $\alpha > \beta$ .

Если луч переходит из оптически более плотной среды в оптически менее плотную (правый рисунок), то он отклоняется от перпендикуляра и  $\alpha < \beta$ .

**Полное отражение** бывает только при переходе света из оптически более плотной среды в оптически менее плотную, т.е. когда  $n_1 > n_2$ . В этом случае преломлённый луч отклоняется от перпендикуляра и приближается к границе раздела двух сред.



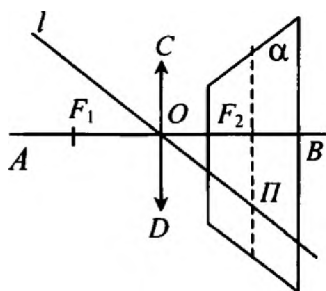
Наступает такой момент, когда угол преломления становится равным  $90^\circ$ . Угол падения, при котором угол преломления равен  $90^\circ$ , называют *предельным*:

$$\sin \alpha_{\text{пред}} = \frac{n_2}{n_1}.$$

**Линзы** — прозрачные, обычно стеклянные тела, ограниченные двумя сферическими поверхностями.

Виды линз:

<p><b>Двояковыпуклые линзы:</b> лупа, объектив фотоаппарата, хрусталик глаза. Собирают лучи, если находятся в оптически менее плотной среде.</p>	
<p><b>Двояковогнутые линзы</b> рассеивают лучи, если находятся в оптически менее плотной среде.</p>	

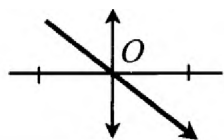


$AB$  — главная оптическая ось,  
 $CD$  — положение линзы,  
 $O$  — оптический центр линзы,  
 $F_1, F_2$  — фокусы линзы,  
 $\alpha$  — фокальная плоскость проходит  
 через фокус перпендикулярно  $AB$

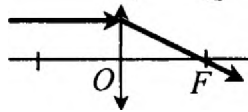
$l$  — побочная оптическая ось проходит через оптический центр,  
 $\Pi$  — побочный фокус линзы — точка пересечения побочной оптической оси и фокальной плоскости.

### Ход лучей в собирающей линзе

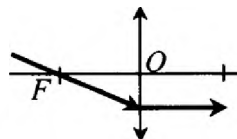
1) Лучи, проходящие через оптический центр линзы, не преломляются.



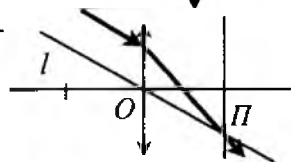
2) Лучи, параллельные главной оптической оси, после преломления в собирающей линзе проходят через фокус.



3) Лучи, проходящие через фокус, после преломления в собирающей линзе пойдут параллельно главной оптической оси.

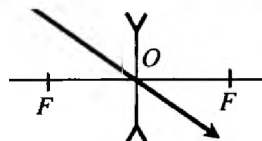


4) Лучи, параллельные побочной оптической оси, пересекаются в побочном фокусе.

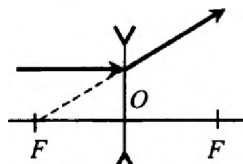


### Ход лучей в рассеивающей линзе

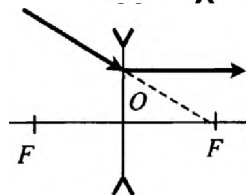
1) Лучи, проходящие через оптический центр линзы, не преломляются.



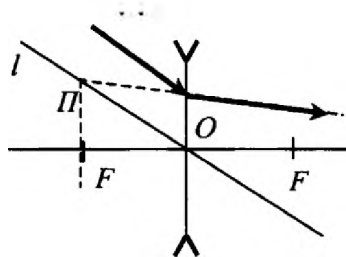
2) Лучи, параллельные главной оптической оси, после преломления в рассеивающей линзе выходят из фокуса.



3) Лучи, идущие в фокус, после преломления в рассеивающей линзе пойдут параллельно главной оптической оси.



4) Лучи, параллельные побочной оптической оси, выходят из побочного фокуса.



### Формула тонкой линзы

$$\pm \frac{1}{F} = \pm \frac{1}{d} \pm \frac{1}{f},$$

где  $F_1$  — передний фокус (ближний к предмету),  $F_2$  — задний фокус,  $F$  — фокусное расстояние,  $d$  — расстояние от линзы до предмета,  $f$  — расстояние от линзы до изображения (до экрана).

$+F$ собирающая линза	$+d$ действительный источник	$+f$ действительное изображение
$-F$ рассеивающая линза	$-d$ мнимый источник	$-f$ мнимое изображение

### Линейное увеличение линзы

$$\Gamma = \frac{H}{h} = \frac{f}{d},$$

где  $h$  — высота предмета,  $H$  — высота изображения.

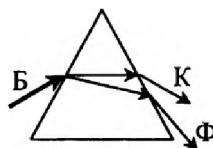
**Оптическая сила линзы** — величина, обратная фокусному расстоянию.

Формула и единица измерения	$D = \pm \frac{1}{F}$ (дптр)	$+D$ у собирающей линзы $-D$ у рассеивающей линзы
-----------------------------	------------------------------	--

### Волновые свойства света

*Белый свет — сложный свет.*

И. Ньютон впервые разложил белый свет на составляющие его пучки разного цвета. Для этого он пропустил узкий пучок света через треугольную стеклянную призму. Радужную полоску, полученную на экране, называли *спектром*. Ньютон увидел в нём семь цветов.



**Фраза-подсказка:** «Каждый охотник желает знать, где сидит фазан».

**Дисперсия** — явление разложения белого света в спектр. Белый свет состоит из электромагнитных волн разной частоты. Попадая в призму, эти волны по-разному преломляются (больше всего преломляются волны, соответствующие фиолетовому цвету, меньше — крас-

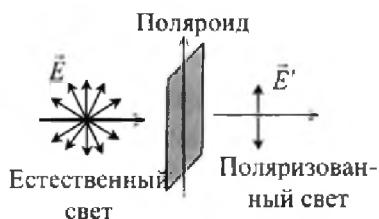
ному) и изменяют свою скорость (быстрее всего движутся «красные волны», медленнее «фиолетовые»). *Дисперсия* — зависимость абсолютного показателя преломления вещества от частоты  $n = f(\nu)$ .

*Светофильтры* — прозрачные тела, которые пропускают определённые длины волн, а остальные поглощают.

*Цвет тел* определяется тем, какие длины волн тело отражает. Например, красные тела отражают длины волн, соответствующие красному цвету, а остальные поглощают. Предмет чёрного цвета всё поглощает, а белого отражает все длины волн.

Под поляризацией света понимают выделение из естественного света световых колебаний с определённым направлением вектора напряжённости  $\vec{E}$ .

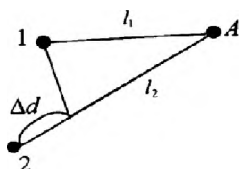
1. Естественный свет проходит через кристалл турмалина (*поляроид*)



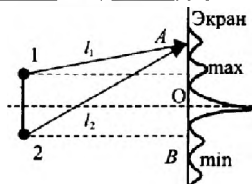
Естественный свет — это электромагнитные волны, в которых колебания вектора напряжённости  $\vec{E}$  лежат в различных плоскостях. После прохождения поляроида остаются волны, в которых колебания  $\vec{E}$  лежат в одной плоскости.

**Интерференция** — сложение волн от когерентных источников.

Интерференция механических волн	Интерференция света
<i>Когерентные источники</i> — это согласованные между собой источники, которые колеблются с одинаковой частотой и разностью фаз	Из-за большой частоты согласовать волны, идущие от разных источников света, нельзя. Поэтому складывают волны, идущие от одного источника, но прошедшие разным путем
<i>Разность хода</i> — разность в расстояниях от источников колебаний до изучаемой точки $\Delta d(\text{м})$	$\Delta d =  l_2 - l_1 $



В точке A происходит наложение двух волн (*интерференция*).



На экране наблюдается интерференция света.

## Условия максимума и минимума интерференции

максимум (волны приходят в фазе):  $\Delta d = n\lambda$

минимум (волны приходят в противофазе):  $\Delta d = (2n + 1) \frac{\lambda}{2}$ .

**Дифракция** — огибание препятствий, сравнимых с длиной волны.

**Дифракционная решётка** — прозрачная пластина, состоящая из большого числа параллельных щелей. Если на дифракционную решётку падает монохроматический свет, то на экране получают интерференционную картину — чередование светлых и тёмных полос.

Условие максимума для дифракционной решётки	$d \sin \varphi = n\lambda$
Порядок максимума: <i>первый, второй и т.д.</i>	$n = 1; n = 2 \dots$
«Наибольший порядок спектра» <i>Учитите: порядок спектра всегда целое число, поэтому смело отбрасывайте дробные части</i>	$\sin \varphi \approx 1$
Период решётки	$d = \frac{l}{N}$

## Элементы теории относительности

### Принципы относительности Галилея

1. Все механические процессы в инерциальных системах отсчёта протекают одинаково.

2. Правило сложения скоростей  $\vec{v}' = \vec{v} + \vec{u}$ .

### Принципы относительности Эйнштейна

1. Все физические процессы в инерциальных системах отсчёта протекают одинаково.

2. Скорость света в вакууме одинакова для всех инерциальных систем отсчёта. Она не зависит ни от скорости источника, ни от скорости приёмника:  $c = \text{const}$ ,  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с.

Связь массы и энергии $E = mc^2$ $\Delta E = \Delta mc^2$	Уменьшение длины $l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$	Увеличение интервалов времени $t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$
Сложение скоростей $v' = \frac{v + u}{1 + \frac{vu}{c^2}}$	Увеличение массы $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$	Релятивистский импульс $p = mv = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} =$

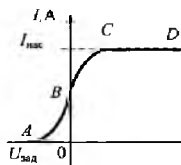
## КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

Энергия излучается порциями (квантами). Энергия кванта пропорциональна частоте (или обратно пропорциональна длине волны):

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}, \quad \text{где } h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \text{ — постоянная Планка.}$$

**Фотоэффект** — явление вырывания электронов из металла под действием света.

*Вольтамперная характеристика* (световой поток, освещённость, интенсивность излучения не изменяются).



1. Точка B ( $U = 0$ ). Под действием света, даже при отсутствии электрического поля, часть вырванных фотоэлектронов достигает противоположного электрода.

2. Участок CD — область насыщения. Количество электронов, вырванных за единицу времени с поверхности катода, достигает за это же время анода.

3. Точка A. При некотором значении обратного напряжения ток прекращается. Это напряжение называют *задерживающим*.

### Законы фотоэффекта

1. Сила тока насыщения прямо пропорциональна освещённости катода  $E$  (или падающему световому потоку  $\Phi$ , или интенсивности излучения  $I$ , или числу фотонов, падающих на электрод в единицу времени) и не зависит от частоты падающего света:  $I_{\text{нас}} = f(E) = \varphi(\Phi)$

2. Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов возрастает с увеличением частоты падающего света, но не зависит от освещённости катода.

3. Для каждого вещества существует *красная граница фотоэффекта* — наименьшая частота  $\nu_{\text{min}}$  (или наибольшая длина волны  $\lambda_{\text{max}}$ ), при которой ещё возможен фотоэффект.

**Объяснение фотоэффекта** (Эйнштейн 1905 г.). Энергия не только испускается, но и поглощается квантами. Фотон приносит электрону энергию, которая идёт на вырывание электрона из металла (работа выхода) и сообщение электрону кинетической энергии.

**Формула Эйнштейна:**  $E_{\text{ф}} = A_{\text{вых}} + E_k$  Энергия фотона:  $E_{\text{ф}} = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$ .

Работа выхода — это энергия взаимодействия электрона с ядром. Зависит от химической природы металла.

$$A_{\text{вых}} = h\nu_{\text{кр}} = \frac{hc}{\lambda_{\text{кр}}}.$$

Кинетическая энергия электрона:  $E_k = \frac{m_e v^2}{2} = q_e U_{\text{зд}}.$



Масса фотона	$m_0 = \frac{E_0}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{h}{c\lambda}$
--------------	---

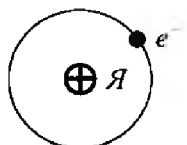
### Давление света

Интенсивность излучения $I$ (Вт/м <sup>2</sup> ) — это мощность излучения, падающего на 1 м <sup>2</sup>	$I = \frac{W}{tS}$ , где $W$ (Дж) — энергия излучения; $S$ (м <sup>2</sup> ) — площадь поверхности
Давление света при поглощении $p$ (Па)	$p = \frac{I}{c}$ , где $c$ — скорость света

## Строение атома

*Экспериментальные факты:*

- 1) атом в целом электрически нейтрален;
- 2) частица с наименьшим отрицательным зарядом (электрон) находится внутри атома;
- 3) масса атома в 1000 раз больше массы электрона.



### Планетарная модель атома Резерфорда

В центре атома находится компактное, массивное, положительно заряженное ядро, вокруг которого на сравнительно большом расстоянии движутся электроны.

*Недостатки модели Резерфорда:* электрон, двигаясь по окружности, имеет центростремительное ускорение. Любая ускоренно движущаяся заряженная частица должна испускать электромагнитную волну. Таким образом, электрон должен терять энергию и «падать» на ядро. Время жизни такого атома  $10^{-7}$  с.

### Постулаты Бора

1. Атомная система может находиться в особых стационарных состояниях, каждому из которых соответствует определенная энергия. Находясь в стационарных состояниях, атом не излучает.
2. Энергия испускается или поглощается при переходе электрона из одного состояния в другое:

$$h\nu = \frac{hc}{\lambda} = E_n - E_k.$$

*По современным представлениям:* положение электрона в атоме подчиняется теории вероятности. Стационарные орбиты — это наиболее вероятные положения электрона в атоме.

1. Энергия электрона в атоме отрицательна.
2. Чем ближе к ядру, тем больше числовое значение энергии.
3. На бесконечности энергия равна нулю.

**Спектральный анализ** — исследование спектров от различных источников.

Каждое вещество имеет свой набор характерных цветных полос. Как преступника можно узнать по отпечаткам пальцев, так химический состав разогретого вещества можно узнать по его спектру. Сначала изучают линейчатые спектры испускания, составляют специальные таблицы. Потом проводят сравнение спектра неизвестного газа с изученными спектрами.

**Атомное ядро** состоит из протонов и нейтронов.

Протон	Нейтрон
$q_p =  q_e  = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$	$q_n = 0$
$m_p = 1,673 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$	$m_n = 1,675 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$

Обозначение химического элемента  ${}_Z^AX$ , где  $Z$  — порядковый номер химического элемента в таблице химических элементов Д.И. Менделеева; **зарядовое число**; количество протонов в ядре; количество электронов в нейтральном атоме.  $A$  — **массовое число**; сумма протонов и нейтронов в ядре.

**Число нейтронов**  $N = A - Z$

**Ионы** — заряженные частицы. Положительный ион — атом, потерявший электрон; отрицательный ион — атом, захвативший лишний электрон.

**Изотопы** — атомы, содержащие в ядре одинаковое число протонов, но разное число нейтронов. Число электронов у изотопов одинаково, поэтому они обладают одинаковыми химическими свойствами, а физическими свойствами изотопы могут отличаться.

Водород ${}_1^1\text{H}$	Дейтерий ${}_1^2\text{H}$	Тритий ${}_1^3\text{H}$
		
$N = 0$	$N = 1$	$N = 2$

**Ядерные силы.** Между протонами и нейтронами действуют силы не электрической природы. Эти силы называют ядерными. Причём для ядерного взаимодействия неважно наличие электрического заряда у протона.

**Нуклоны** — частицы, входящие в состав ядра (с точки зрения ядерного взаимодействия). Число нуклонов равно сумме протонов и нейтронов ( $A$ ).

**Масса атомного ядра.** Точные опыты показали, что масса ядра меньше суммы масс составляющих его частиц:

$$m_{\text{я}} < Zm_p + Nm_n.$$

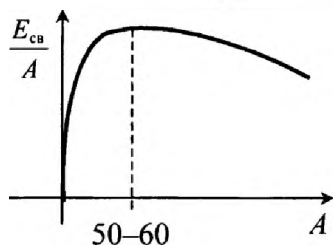
**Дефект массы**  $\Delta m = Zm_p + Nm_n - m_{\text{я}}$  (а.е.м.)  $1 \text{ а.е.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ .

**Энергия связи** — энергия, которую необходимо затратить, чтобы разделить ядро на отдельные нуклоны, или энергия, которая выделяется при формировании ядра:

$$E_{\text{св}} = \Delta mc^2 \text{ (эВ)},$$

**Удельная энергия связи** — энергия связи, приходящаяся на один нуклон:

$$\frac{E_{\text{св}}}{A} = \frac{\Delta mc^2}{A} \text{ (Дж/нуклон)}. \quad A = \text{число нуклонов}$$



Зависимость удельной энергии связи от массового числа

Удельная энергия связи характеризует устойчивость (прочность) ядер. Чем больше удельная энергия связи, тем

- 1) устойчивее ядро,
- 2) лучше взаимодействуют нуклоны,
- 3) сложнее выбить нейтрон или протон из ядра.

Из графика видно, что *энергетически выгодно* деление тяжёлых ядер и слияние лёгких.

**Радиоактивность** — способность некоторых ядер к самопроизвольному превращению в другие ядра. Обычно этот процесс сопровождается испусканием различных частиц.

**Естественная радиоактивность.** Ядерное взаимодействие короткодействующее. Ядра тяжёлых элементов имеют сравнительно большие размеры, поэтому между отдельными участками может возникнуть электрическое отталкивание, и ядро разрушается.

**Искусственная радиоактивность.** Даже лёгкие ядра под действием других элементарных частиц становятся радиоактивными.

**Виды радиоактивных излучений.** Если излучение, идущее от радиоактивного вещества, поместить в электрическое (или магнитное) поле, то оно распадается на три потока.

<b>Заряд</b>	Положительный	Нейтральный	Отрицательный
<b>Название</b>	$\alpha$ -лучи	$\gamma$ -лучи	$\beta$ -лучи
<b>Состав излучения</b>	Ядра атома гелия ${}^4_2\text{He}$	Коротковолновое электромагнитное излучение	Поток электронов ${}^0_{-1}e$
<b>Что происходит с ядрами</b>	Из ядра вылетает ${}^4_2\text{He}$	Ядро из возбужденного состояния переходит в основное	В ядре происходит распад нейтрона ${}^1_0n = {}^0_{-1}e + {}^1_1p$
<b>Превращения в ядрах</b>	$\alpha$ -распад ${}^A_ZX = {}^4_2\text{He} + {}^{A-4}_{Z-2}Y$	$\gamma$ -распад ${}^A_ZX = {}^A_ZX$	$\beta$ -распад ${}^A_ZX = {}^0_{-1}e + {}^A_{Z+1}Y$
<b>Защита от излучения</b>	Лист бумаги толщиной 0,1 мм	Слой свинца	Алюминиевая пластина толщиной 3,5 см

### Закон радиоактивного распада

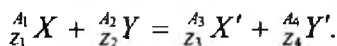
$$N = \frac{N_0}{2^{\frac{t}{T}}} \text{ или } m = \frac{m_0}{2^{\frac{t}{T}}},$$

где  $N(t)$  — число (масса) *не распавшихся* ядер в момент времени  $t$ ,  
 $N_0(m_0)$  — начальное число (первоначальная масса) *не распавшихся* ядер;  
 $T$  — период полураспада.

**Период полураспада** — время, за которое исходное число ядер в среднем уменьшается вдвое.

Количество радиоактивных ядер уменьшилось в $n$ раз	$N = \frac{N_0}{n}$
Масса радиоактивного вещества уменьшилась в $n$ раз	$m = \frac{m_0}{n}$
Число распавшихся ядер	$N_0 - N$
Произошёл распад $5/8$ исходных ядер	Осталось $N = \frac{3N_0}{8}$
Доля не распавшихся ядер (в процентах)	$\frac{N}{N_0} \cdot 100\%$

**Ядерные реакции** — это изменения в ядрах, которые происходят под действием других ядер или элементарных частиц:



**Законы сохранения:**

$$\Sigma Z = \Sigma Z' ; \Sigma A = \Sigma A' ; \Sigma N = \Sigma N'.$$

*Учитите:* в ядерных реакциях закон сохранения заряда выполняется полностью, а закон сохранения массы «нарушается». Изменение массы связано с выделением или поглощением энергии. В ядерных реакциях энергия выделяется, если  $m_1 + m_2 > m'_1 + m'_2$ , а поглощается если  $m_1 + m_2 < m'_1 + m'_2$ .

Значение выделенной или поглощённой энергии вычисляется по формуле:

$$E = |(m_1 + m_2) - (m'_1 + m'_2)| \cdot c^2,$$

где  $c$  — скорость света.