

## Кинематика

**Кинематика** – раздел механики, в котором изучается механическое движение тел независимо от причин, вызывающих и изменяющих это движение.

**Механическое движение** – изменение положения тел в пространстве относительно других тел с течением времени.

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

**Траектория** – воображаемая линия, которую описывает материальная точка при своем движении.

Механическое движение **относительно**. Движение одного и того же тела относительно разных тел оказывается различным. Для описания движения тела нужно указать, по отношению к какому телу рассматривается движение. Это тело называют **телом отсчета**.

Система координат, связанная с телом отсчета, и часы для отсчета времени образуют **систему отсчета**, позволяющую определять положение движущегося тела в любой момент времени.

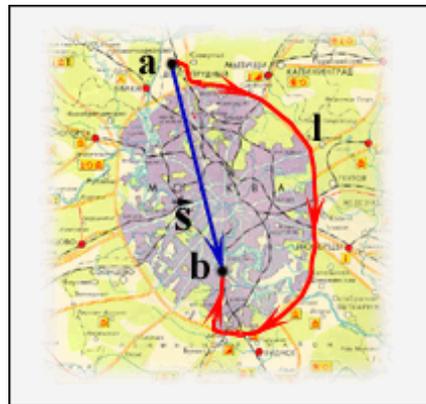
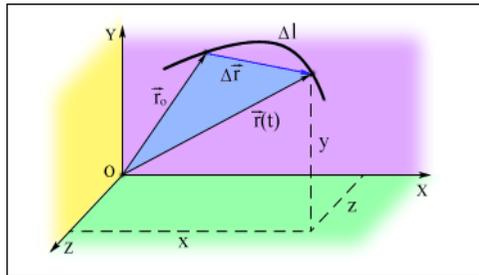
В Международной системе единиц (СИ) за единицу длины принят **метр**, а за единицу времени – **секунда**.

Положение материальной точки в пространстве в любой момент времени (**закон движения**) можно определять либо с помощью зависимости координат от времени  $x = x(t)$ ,  $y = y(t)$ ,  $z = z(t)$  (координатный способ), либо при помощи зависимости от времени радиус-вектора  $\vec{r} = \vec{r}(t)$  (векторный способ), проведенного из начала координат до данной точки.

**Перемещением** тела  $\Delta\vec{r} = \vec{r} - \vec{r}_0$  (иногда перемещение обозначают  $\vec{s}$ ) называют направленный отрезок прямой, соединяющий начальное положение тела с его последующим положением.

**Перемещение есть векторная величина.**

**Пройденный путь  $s$  или  $\ell$**  равен длине участка траектории, пройденной телом за некоторое время  $t$ . **Путь – скалярная величина.**



**Перемещение** тела  $\Delta\vec{r} = \vec{r} - \vec{r}_0$ ;  $\Delta r = \sqrt{\Delta r_x^2 + \Delta r_y^2}$ .

**Скорость**  $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$ ;  $[v] = 1 \text{ м/с}$ ; **ускорение**  $a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2}$ ;  $[a] = 1 \text{ м/с}^2$ .

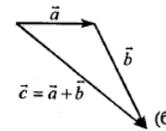
При прямолинейном движении вдоль оси OX:  $\Delta r_x = x_2 - x_1$ .

**Средняя скорость пути:**  $\langle v \rangle = \frac{S}{\Delta t}$ ; средняя скорость перемещения  $\langle \vec{v} \rangle = \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}$ .

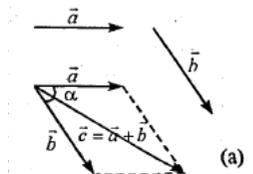
**Классический закон сложения скоростей:**  $\vec{v} = \vec{v}_1 + \vec{v}_2$ ; где  $\vec{v}$  – скорость тела относительно неподвижной системы отсчета,  $\vec{v}_1$  – скорость тела относительно подвижной системы отсчета,  $\vec{v}_2$  – скорость подвижной системы отсчета относительно неподвижной.

**Сложение векторов.**

Правило треугольника:

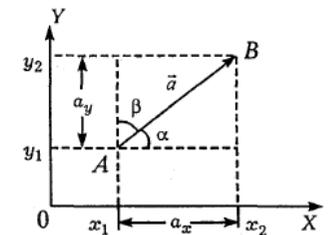


Правило параллелограмма:



**Проекции векторов на оси координат.**

$a_x = x_2 - x_1 = a \cdot \cos\alpha$ ;  $a_y = y_2 - y_1 = a \cdot \sin\alpha$ .

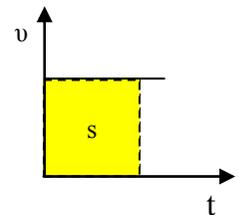


**Прямолинейное равномерное движение**

$a = 0$ ;  $\vec{v} = \text{const}$ ;  $\Delta\vec{r} = \vec{v} \cdot t$ , в проекциях  $\Delta r_x = v_x \cdot t$ .

Закон равномерного движения:  $x(t) = x_0 + v_x t$ .

Пройденный путь численно равен площади фигуры под графиком скорости тела от времени.



(Справедливо для любого вида движения)

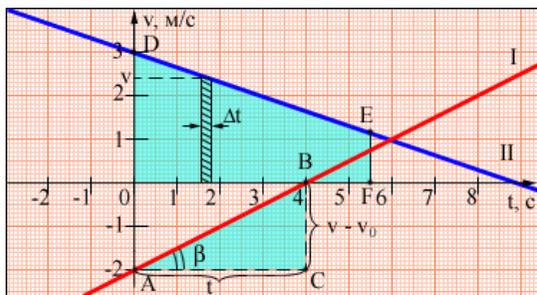
## Прямолинейное равноускоренное движение

$$a_x = \text{const}; \quad v_x = v_{0x} + a_x t; \quad \Delta r_x = v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2} \quad \text{или} \quad \Delta r_x = \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{2a_x}.$$

$$\text{Закон равноускоренного движения: } x(t) = x_0 + v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}.$$

На рис. Показаны графики проекции скорости тел от времени.

У первого тела  $a_x > 0$ ;  
у второго тела  $a_y < 0$ ; чем больше угол наклона графика к оси  $t$  (времени), тем больше модуль ускорения.



## Равномерное движение по окружности

$$\text{Угловая скорость } \omega = \text{const}; \quad \omega = \frac{\Delta\varphi}{t} = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T};$$

$$[\omega] = 1 \text{ рад/с.}$$

$$\text{Период (время одного оборота) } T = t/N; \quad \text{частота } \nu = \frac{1}{T} = \frac{N}{t}; \quad [\nu] = 1/\text{с} = \text{с}^{-1} = \text{Гц.}$$

$$\text{Линейная скорость } v = \frac{\ell}{t} = \frac{2\pi R}{T} = 2\pi \nu R; \quad v = \omega R.$$

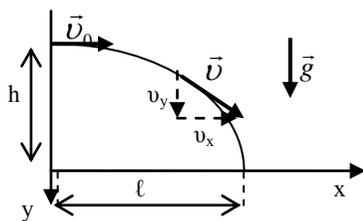
$$\text{Центростремительное (нормальное) ускорение } a_u = \frac{v^2}{R} = \omega^2 R.$$

## Движение тела, брошенного горизонтально.

**По оси  $ox$ :**  $g_x = 0$ ; значит движение равномерное:  $\ell = v_x \cdot t$ ;  $v_x = v_0$ .

**По оси  $oy$ :**  $g_y = g$ ;  $v_{0y} = 0$ ; движение равноускоренное:  $v_y = gt$ ;  $h = gt^2/2$ ;

$$\text{Или } h = \frac{v_y^2}{2g}. \quad \text{При этом } v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$$



## Динамика

**Первый закон Ньютона (закон инерции):** Существуют такие системы отсчета, в которых тела движутся равномерно прямолинейно или остаются в состоянии покоя, если на них не действуют другие тела или действие других тел скомпенсировано. Указанные системы отсчета, называют **инерциальными системами отсчета**.

**Равнодействующая сила  $F$**  – векторная сумма сил, действующих на тело.

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots \quad \text{В проекциях на оси координат}$$

$$F_x = F_{1x} + F_{2x} + F_{3x} + \dots \quad F_y = F_{1y} + F_{2y} + F_{3y} + \dots \quad F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$$

**Второй закон Ньютона:**  $\vec{F} = m\vec{a}$

Основное уравнение динамики  $m\vec{a} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots$ . Или в проекциях на оси:  $ma_x = F_{1x} + F_{2x} + F_{3x} + \dots$ ;  $ma_y = F_{1y} + F_{2y} + F_{3y} + \dots$ .

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

$$\text{Закон всемирного тяготения} \quad F = G \frac{m_1 m_2}{R^2};$$

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

**Сила тяжести  $\vec{F}_T = m\vec{g}$** ;  $g$  – ускорение свободного падения.

Для поверхности Земли  $g = G \frac{M}{R^2} \approx 10 \text{ м/с}^2$ ;

на высоте  $h$  от поверхности  $g_h = G \frac{M}{(R+h)^2}$ .

**Скорость движения спутника** по круговой орбите вокруг планеты на высоте

$h$  от поверхности:  $v = \sqrt{\frac{GM}{R+h}}$ ;

у поверхности (**первая космическая**)  $v_1 = \sqrt{\frac{GM}{R}}$ ;

**Вес тела** – сила, с которой тело вследствие притяжения к Земле, действует на опору или подвес, неподвижные относительно тела:  $\vec{P} = -\vec{N}$ , где  $N$  – сила реакции опоры.

$$\text{Плотность однородного тела} \quad \rho = \frac{m}{V};$$

$m$  – масса тела,  $V$  – объем тела.

**Закон Гука:** Сила упругости, возникающая при малых деформациях тела, прямо пропорциональна абсолютному удлинению тела и направлена в сторону, противоположную направлению смещения частиц тела.

$$F_{\text{упр}} = k \cdot \Delta l \text{ или } F_{\text{упр}} = k \cdot x;$$

$k$  – коэффициент упругости (жесткость),  $\Delta l = x = l - l_0$  – удлинение.

Или  $F = \frac{ES}{l_0} \Delta l$ ,  $l_0$  – начальная длина тела,  $S$  – площадь поперечного сечения,

$E$  – модуль упругости (модуль Юнга)

**Сила трения покоя** имеет максимальное значение  $F_{\text{тр.п.макс}} = \mu N$ .

**Сила трения скольжения**  $F_{\text{тр}} = \mu N$ ,

$\mu$  – коэффициент трения.

## Законы сохранения в механике

**Импульс тела** массой  $m$ , движущегося со скоростью  $\vec{v}$ ,

$$\vec{p} = m\vec{v}, [p] = \text{кг} \cdot \text{м}/\text{с}.$$

**Импульс силы** равен изменению импульса тела:

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

**Закон сохранения импульса:** векторная сумма импульсов тел составляющих замкнутую систему остается неизменной при любых взаимодействиях внутри этой

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

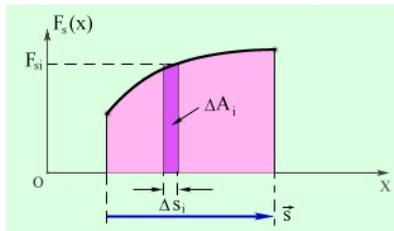
системы.

**Работа постоянной силы  $F$ :**  $A = Fs \cos \alpha$ ,

где  $s$  – модуль перемещения,  $\alpha$  – угол между векторами  $\vec{F}$  и  $\vec{s}$ .

Работа является скалярной величиной. Она может быть как положительна ( $0^\circ \leq \alpha < 90^\circ$ ), так и отрицательна ( $90^\circ < \alpha \leq 180^\circ$ ). При  $\alpha = 90^\circ$  работа, совершаемая силой, равна нулю. В системе СИ работа измеряется в **джоулях (Дж)**.

Работа любой силы (постоянной и переменной) численно равна площади фигуры под графиком функции  $F(x)$ .



**Мощность**  $P = \frac{A}{t}$  или  $P = Fv \cdot \cos \alpha$ .  $[P] = 1 \text{ Вт}$  (1 Ватт)

**Кинетическая энергия** тела массой  $m$ , движущегося со скоростью  $v$ ,

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

**Теорема о кинетической энергии:** изменение кинетической энергии тела равно работе равнодействующей сил, приложенных к телу:

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

**Потенциальная энергия** тела массой  $m$ , поднятого на высоту  $h$  относительно нулевого уровня,

$$E_p = mgh.$$

Потенциальная энергия упруго деформированного тела (сжатой или растянутой пружины):

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

где  $k$  – коэффициент упругости (жесткость) тела.;  $x$  – абсолютная деформация.

**Закон сохранения энергии в механике:** полная механическая энергия замкнутой системы тел, взаимодействующих силами тяготения и упругости, остается

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

Изменение полной механической энергии системы равно работе внешних сил:

$$E_2 - E_1 = A.$$

Изменение полной механической энергии замкнутой системы, в которой между телами действуют силы трения, равно работе сил трения:  $E_2 - E_1 = A_{\text{тр}}$ .

**Коэффициент полезного действия (КПД)**  $\eta = \frac{A_n}{A_z}$ ;

где  $A_n$  – полезная работа,  $A_z$  – затраченная работа.

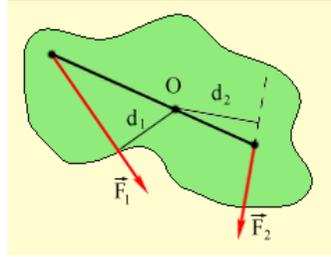
**Абсолютно упругим ударом** называется такое кратковременное взаимодействие тел, после которого тела полностью восстанавливают свою форму, а их суммарная кинетическая энергия не изменяется. При абсолютно упругом ударе выполняются закон сохранения импульса и закон сохранения механической энергии.

**Абсолютно неупругим ударом** называется такое кратковременное взаимодействие тел, после которого соударяющиеся тела образуют единое тело, движущееся с определенной скоростью, а суммарная кинетическая энергия тел уменьшается. При абсолютно неупругом ударе выполняется закон сохранения импульса, а механическая энергия не сохраняется, часть ее превращается во внутреннюю энергию тел.

## Основы статики

**Плечом силы** относительно оси называется расстояние (длина перпендикуляра) от этой оси до линии действия силы.

**Моментом силы** относительно оси называется произведение модуля силы на ее плечо относительно этой оси:  $M = Fd$ .



*Условия равновесия твердого тела*

1) сумма внешних сил, действующих на тело, равна нулю:

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

2) сумма моментов внешних сил, действующих на тело, относительно любой оси равна нулю:  $M_1 + M_2 + \dots = 0$ .

## Жидкости и газы

**Давление** – скалярная физическая величина, равная отношению модуля силы  $\vec{F}$ , действующей перпендикулярно поверхности, к площади  $S$  этой

поверхности:

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

**Гидростатическое давление** внутри жидкости на глубине  $h$ :

$$p = \rho gh,$$

где  $\rho$  – плотность жидкости;  $g$  – ускорение свободного падения.

**Полное давление** внутри покоящейся жидкости на глубине  $h$ :

$$p_n = p_0 + \rho gh,$$

где  $p_0$  – давление на открытой поверхности.

Нормальное атмосферное давление  $p_0 = 760 \text{ мм рт. ст.} = 101000 \text{ Па}$

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

**Закон Паскаля:** давление, производимое на жидкость или газ, передается без изменения по всем направлениям в каждую точку жидкости или газа.

**Средняя сила**, с которой жидкость давит на плоскую боковую стенку сосуда,

$$F_{\text{ст}} = p_{\text{ц}} S,$$

где  $p_{\text{ц}}$  – давление жидкости на глубине центра тяжести жидкости.

**Гидравлический пресс** обеспечивает выигрыш в силе

$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{S_2}{S_1} = \frac{h_1}{h_2}$$

**Архимедова сила**, действующая на тело, погруженное в жидкость или газ,

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

где  $\rho_{\text{ж}}$  – плотность жидкости;  $V_{\text{т}}$  – объем погруженной части тела.

## Молекулярная физика

**Количество вещества**

$$\nu = \frac{N}{N_A} = \frac{m}{M},$$

где  $m$  – масса вещества;  $M$  – его молярная масса;  $N$  – число молекул;

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

$$M = m_0 N_A,$$

где  $m_0$  – масса одной молекулы.

**Основное уравнение** молекулярно-кинетической теории идеального газа:

$$p = \frac{1}{3} m_0 n \langle v_{\text{кв}} \rangle^2; \quad p = \frac{2}{3} n \langle E \rangle; \quad p = nkT$$

где  $p$  – давление газа;  $m_0$  – масса молекулы;  $n = \frac{N}{V}$  – концентрация молекул;

$\langle v_{\text{кв}} \rangle$  – средняя квадратичная скорость молекул,  $\langle E \rangle$  – средняя кинетическая энергия поступательного движения молекулы газа,  $T$  – термодинамическая (абсолютная) температура газа.

**Средняя квадратичная скорость** молекул:  $\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\langle v^2 \rangle} = \sqrt{\frac{3RT}{M}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}$ ,

где  $k$  – постоянная Больцмана:  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ ;

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

**Средняя кинетическая энергия** поступательного движения молекулы газа

$$\langle E \rangle = \frac{3}{2} kT.$$

**Уравнение состояния** идеального газа (уравнение Менделеева-Клапейрона)

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

**Изотермический закон:**

для газа данной массы при постоянной температуре ( $m = \text{const}$ ,  $T = \text{const}$ )

$$pV = \text{const} \quad \text{или} \quad p_1 V_1 = p_2 V_2.$$

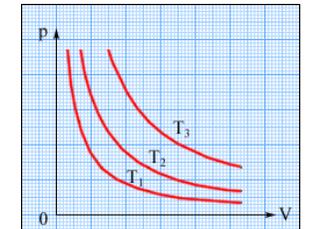


Рисунок  
Семейство изотерм на плоскости  $(p, V)$ .  $T_3 > T_2 > T_1$ .

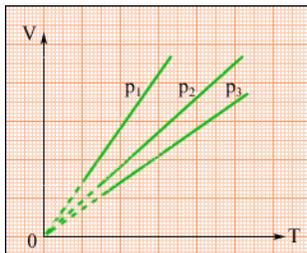
### Изобарный закон:

для газа данной массы при постоянном давлении

$$(m = \text{const}, p = \text{const}) \quad \frac{V}{T} = \text{const} \quad \text{или} \quad \frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

Рисунок

Семейство изобар на плоскости  $(V, T)$ .  $p_3 > p_2 > p_1$ .



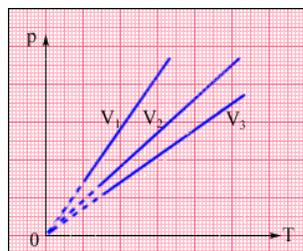
### Изохорный закон:

для газа данной массы при постоянном объеме

$$(m = \text{const}, V = \text{const}) \quad \frac{p}{T} = \text{const} \quad \text{или} \quad \frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$$

Рисунок

Семейство изохор на плоскости  $(p, T)$ .  $V_3 > V_2 > V_1$ .



**Уравнение Клапейрона** (объединенный газовый закон): если  $m = \text{const}$ , то

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

**Термодинамическая температура**  $T = t + 273$ , где  $t$  – температура Цельсия.

Изменение термодинамической температуры равно изменению температуры Цельсия:  $\Delta T = \Delta t$ .

**Нормальные условия:** давление  $p_0 = 760$  мм рт. ст. = 101000 Па, температура  $T_0 = 273$  К ( $0^\circ\text{C}$ ).

**Закон Дальтона:** давление смеси химически не взаимодействующих идеальных газов равно сумме парциальных давлений этих газов:

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

**Абсолютной влажностью** называется количество водяного пара, содержащегося в  $1 \text{ м}^3$  воздуха при данной температуре  $p$ .

Отношение  $p / p_0$  или  $\rho / \rho_0$ , выраженное в процентах, называется **относительной влажностью** воздуха.

$$\varphi = \frac{p}{p_0} = \frac{\rho}{\rho_0}$$

где  $p$  – парциальное давление водяного пара, содержащегося в воздухе при

данной температуре;  $p_0$  – давление насыщенного водяного пара при той же температуре;  $\rho$  – абсолютная влажность воздуха при данной температуре;  $\rho_0$  – плотность насыщенного водяного пара при той же температуре.

Сила поверхностного натяжения жидкости

$$F = \sigma l,$$

$\sigma$  – поверхностное натяжение;  $l$  – длина границы поверхностного слоя жидкости.

Коэффициент  $\sigma$  называется коэффициентом **поверхностного натяжения** ( $\sigma > 0$ ). Коэффициент поверхностного натяжения равен работе, необходимой для увеличения площади поверхности жидкости при постоянной температуре на единицу.

$$\Delta A_{\text{внеш}} = \sigma \Delta S.$$

В СИ коэффициент поверхностного натяжения измеряется в **джоулях на метр квадратный** ( $\text{Дж}/\text{м}^2$ ) или в **ньютонках на метр** ( $1 \text{ Н}/\text{м} = 1 \text{ Дж}/\text{м}^2$ ).

Высота поднятия (или опускания) жидкости в капилляре

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

где  $\theta$  – краевой угол,  $r$  – радиус капилляра. При полном смачивании  $\theta = 0^\circ$ , а при полном несмачивании  $\theta = 180^\circ$ .

### Тепловые явления. Основы термодинамики.

**Внутренняя энергия** одноатомного идеального газа  $U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT$

**Изменение внутренней энергии** одноатомного идеального газа

$$\Delta U = U_2 - U_1 = \frac{3}{2} \frac{m}{M} R \Delta T$$

**Работа газа** при изобарном процессе:  $A = p(V_2 - V_1) = \frac{m}{M} R(T_2 - T_1)$ .

**Работа внешних сил:**  $A' = -A$

**Количество теплоты** ( $Q$ ), отданное ( $Q < 0$ ) или полученное ( $Q > 0$ ) телом при охлаждении или нагревании, определяется соотношением:

$$Q = cm(t_2 - t_1) = cm(T_2 - T_1),$$

где  $m$  – масса тела,  $t_2(t_1)$  – конечная (начальная) температура,  $c$  – удельная теплоемкость. Удельная теплоемкость вещества  $c$  – теплоемкость единицы массы вещества, т.е. количество теплоты, необходимое для нагревания

единицы массы вещества на 1 К:  $c = \frac{Q}{m\Delta t}$   $[c] = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ .

Теплоемкость тела массой  $m$  равна  $C = cm$ .  $[C] = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$ .

**Теплота парообразования**  $Q_{\text{пар}}$  – количество теплоты, необходимое для превращения жидкости в пар или выделяемое при конденсации:  $Q_{\text{пар}} = Lm$ .

$L$  – удельная теплота парообразования.

**Теплота плавления** твердого тела  $Q_{\text{пл}}$  – количество теплоты необходимое для плавления тела или выделяемое при кристаллизации.

$$Q_{\text{пл}} = \lambda m.$$

Здесь  $\lambda$  – удельная теплота плавления – количество теплоты, необходимое для плавления или кристаллизации единицы массы вещества (при неизменной температуре).

**При парообразовании (конденсации) и плавлении (кристаллизации) температура вещества не изменяется.**

**Теплота сгорания**  $Q_c$  – количество теплоты выделяемое при сгорании топлива:

$$Q_c = qm.$$

Здесь  $q$  – удельная теплота сгорания топлива – количество теплоты, выделяемое при сгорании единицы массы топлива.

$$[q] = [\lambda] = [L] = \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$$

**Закон сохранения и превращения энергии:** во всех процессах, происходящих в природе, энергия не возникает из ничего и не исчезает, а лишь передается от одних тел к другим или превращается из одного вида в другой.

**Первый закон термодинамики:** количество теплоты, переданное системе, расходуется на изменение ее внутренней энергии и на совершение системой работы над внешними телами:

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

Применим первый закон термодинамики к изопроцессам в газах.

1. В **изохорном процессе** ( $V = \text{const}$ ) газ работы не совершает,  $A = 0$ . Следовательно,  $Q = \Delta U$ .
2. В **изобарном процессе** ( $p = \text{const}$ ). Первый закон термодинамики дает:  $Q = \Delta U + A$ .
3. В **изотермическом процессе** температура газа не изменяется, следовательно, не изменяется и внутренняя энергия газа,  $\Delta U = 0$ .

Первый закон термодинамики для изотермического процесса выражается соотношением

$$Q = A.$$

В **адиабатическом процессе**  $Q = 0$ ; поэтому первый закон термодинамики принимает вид

$$A = -\Delta U,$$

т. е. газ совершает работу за счет убыли его внутренней энергии.

**Коэффициент полезного действия**  $\eta$  тепловой машины:

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

где  $A = Q_1 - Q_2$  – работа, совершаемая двигателем;

$Q_1, Q_2$  – количество теплоты, соответственно полученное двигателем от нагревателя и отданное холодильнику.

Максимальное значение КПД теплового двигателя равно КПД идеальной тепловой машины:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

где  $T_1$  – температура нагревателя;  $T_2$  – температура холодильника.

**Второй закон термодинамики:** невозможно перевести теплоту от более холодной системы к более нагретой при отсутствии других одновременных изменений в обеих системах или в окружающих телах.

## Электростатика

**Закон сохранения электрического заряда:** В изолированной системе алгебраическая сумма зарядов всех тел остается постоянной:

$$q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n = \text{const.}$$

**Элементарный заряд**  $e \approx 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл.

Заряд может передаваться от одного тела к другому только порциями, содержащими целое число элементарных зарядов. Таким образом, электрический заряд тела – дискретная величина:  $q = \pm n e$  ( $n = 0, 1, 2, \dots$ ).

**Закон Кулона:** сила взаимодействия двух неподвижных точечных зарядов прямо пропорциональна произведению модулей зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними:

$$F = k \frac{|q_1| |q_2|}{\varepsilon \cdot r^2}$$

где  $k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} = 9 \cdot 10^9$  (Н·м<sup>2</sup>)/Кл<sup>2</sup> – коэффициент пропорциональности в СИ;

$\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды;  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – электрическая постоянная.

**Напряженность электростатического поля** в данной точке

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

где  $F$  – сила, с которой поле действует на положительный точечный заряд  $q_0$ , помещенный в эту точку.

**Принцип суперпозиции полей:**  $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots$

*Напряженность электрического поля точечного заряда  $q$  на расстоянии  $r$  от него*

$$E = k \frac{q}{\varepsilon \cdot r^2}$$

**Потенциал электрического поля** в данной точке:  $\varphi = W_p/q_0$

где  $W_p$  – потенциальная энергия, которой обладает заряд  $q_0$ , помещенный в эту точку.

**Принцип суперпозиции потенциалов:**  $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \dots$

*Потенциал электростатического поля точечного заряда  $q$  на расстоянии  $r$  от него*

$$\varphi = k \frac{q}{\varepsilon \cdot r}$$

**Работа**, совершаемая электростатическим полем при перемещении заряда  $q$  из точки с потенциалом  $\varphi_1$  в точку с потенциалом  $\varphi_2$ ,

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2) = qU.$$

**Напряжение  $U = (\varphi_1 - \varphi_2)$**

**Потенциальная энергия** взаимодействия двух точечных зарядов  $q_1$  и  $q_2$ :

$$W = k \frac{q_1 q_2}{r}$$

Связь между напряженностью однородного электрического поля и напряжением:

$$E = \frac{U}{d},$$

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

**Емкость проводника (конденсатора):**  $C = \frac{q}{\varphi}$  ( $C = \frac{q}{U}$ )

где  $q$  – заряд проводника;  $\varphi$  – потенциал проводника,  $U$  – напряжение между обкладками конденсатора.

**Емкость плоского конденсатора**, площадь каждой пластины которого  $S$ , а расстояние между ними  $d$ :

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d}.$$

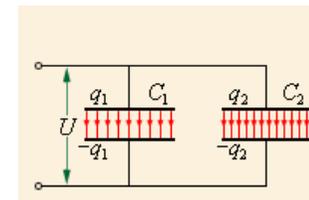
Конденсаторы могут соединяться между собой, образуя батареи конденсаторов. При **параллельном соединении** конденсаторов (см. рис.) напряжения на конденсаторах одинаковы:

$$U_1 = U_2 = U, \text{ а заряды равны } q_1 = C_1 U \text{ и } q_2 = C_2 U.$$

Такую систему можно рассматривать как единый конденсатор емкости  $C$ , заряженный зарядом  $q = q_1 + q_2$  при напряжении между обкладками равном  $U$ . Отсюда следует

$$C = C_1 + C_2.$$

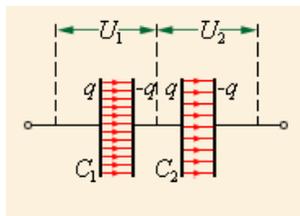
**Таким образом, при параллельном соединении емкости складываются.**



При **последовательном соединении** одинаковыми оказываются заряды обоих конденсаторов:  $q_1 = q_2 = q$ , а

напряжения на них равны  $U_1 = \frac{q}{C_1}$  и  $U_2 = \frac{q}{C_2}$ .

Такую систему можно рассматривать как единый конденсатор, заряженный зарядом  $q$  при напряжении между обкладками  $U = U_1 + U_2$ .



Следовательно, 
$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

При последовательном соединении конденсаторов складываются обратные величины емкостей.

Энергия электрического поля заряженного конденсатора емкостью  $C$

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

## Законы постоянного тока

Сила постоянного электрического тока

$$I = \frac{q}{t}; \quad [I] = \text{А (Ампер)}$$

где  $q$  – заряд, переносимый через поперечное сечение проводника за время  $t$ .  
Закон Ома для участка цепи, не содержащего ЭДС:

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

где  $I$  – сила тока,  $U$  – напряжение на этом участке;  $R$  – сопротивление.

**Электрическое сопротивление** проводника длиной  $\ell$  с постоянной площадью поперечного сечения  $S$

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

где  $\rho$  – удельное сопротивление проводника.

**Сопротивление проводника** при температуре  $t$

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

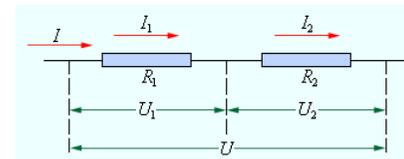
где  $R_0$  – сопротивление при температуре  $0^\circ\text{C}$ ,  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления.

## Последовательное и параллельное соединение проводников

При последовательном соединении

проводников сила тока во всех проводниках одинакова:

$$I_1 = I_2 = I.$$



Общее напряжение  $U$  на обоих проводниках равно сумме напряжений  $U_1$  и  $U_2$ :

$$U = U_1 + U_2$$

При последовательном соединении полное сопротивление цепи равно сумме сопротивлений отдельных проводников.

Этот результат справедлив для любого числа последовательно соединенных проводников.

$$R = R_1 + R_2.$$

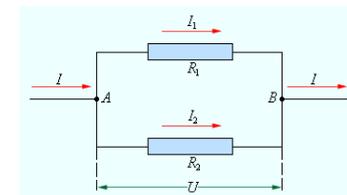
Если последовательно включены  $n$  одинаковых проводников, то общее сопротивление  $R = n \cdot R_1$ .

При параллельном соединении проводников напряжения  $U_1$  и  $U_2$  на обоих проводниках одинаковы:

$$U_1 = U_2 = U.$$

Сумма токов  $I_1 + I_2$ , протекающих по обоим проводникам, равна току в неразветвленной цепи:

$$I = I_1 + I_2.$$



При параллельном соединении проводников величина, обратная общему сопротивлению цепи, равна сумме величин, обратных сопротивлениям параллельно включенных проводников.

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

Этот результат справедлив для любого числа параллельно включенных проводников.

Для двух проводников  $R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$

Если в цепь параллельно включены  $n$  одинаковых проводников, то общее сопротивление

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

**Закон Ома для замкнутой цепи:**

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

где  $I$  – сила тока в цепи,  $\mathcal{E}$  – ЭДС источника;  $R$  – сопротивление внешнего участка цепи;  $r$  – внутреннее сопротивление источника.

**Напряжение на зажимах источника**

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

Сила тока при коротком замыкании источника

$$I_k = \mathcal{E} / r.$$

**Работа постоянного электрического тока**

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

**Мощность постоянного тока**

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

**Закон Джоуля-Ленца:** количество теплоты, выделяемое проводником сопротивлением  $R$  с током  $I$ ,

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

где  $t$  – время прохождения тока.

**Полная мощность,** развиваемая источником тока,

$$P = I\mathcal{E} = I^2(R + r) = \frac{\mathcal{E}^2}{R + r},$$

**Полезная мощность** (мощность, выделяемая на внешнем участке цепи, сопротивление которого  $R$ )

$$P_n = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R} = I\mathcal{E} - I^2 r = \frac{\mathcal{E}^2 R}{(R + r)^2}$$

**Коэффициент полезного действия (КПД)** источника тока

$$\eta = \frac{P_n}{P} = \frac{U}{\mathcal{E}} = \frac{R}{R + r}$$

От данного источника можно получить **наибольшую полезную мощность** тогда, когда сопротивление внешней цепи равно сопротивлению источника ( $R=r$ ).

**Законы Фарадея для электролиза:**

1. Масса  $m$  вещества, выделившегося на электроде, пропорциональна заряду  $q$ , прошедшему через электролит:

$$m = kq = kIt,$$

где  $k$  – электрохимический эквивалент вещества.

2. Электрохимический эквивалент вещества пропорционален его химическому эквиваленту:

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

где  $F = 9,65 \cdot 10^4$  Кл/моль – постоянная Фарадея;  $M$  – молярная масса;  $n$  – валентность.

**Магнитное поле. Электромагнитная индукция.**

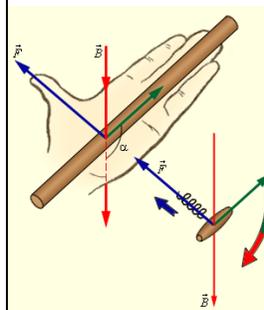
**Закон Ампера:** на проводник длиной  $\ell$  с током  $I$ , помещенный в магнитное поле, действует сила, модуль которой

$$F = IB\ell \cdot \sin\alpha,$$

где  $\alpha$  – угол между направлением тока и вектором магнитной индукции,  $B$  – модуль вектора магнитной индукции.

Направление этой силы определяется правилом левой руки:

если расположить левую руку так, чтобы линии индукции  $\vec{B}$  входили в ладонь, а вытянутые пальцы были направлены вдоль тока, то отведенный большой палец укажет направление силы, действующей на проводник.



**Принцип суперпозиции магнитных полей:** Если магнитное поле в данной точке пространства создается несколькими проводниками с током, то индукция результирующего поля есть векторная сумма индукции полей, создаваемых каждым проводником с током в отдельности:  $\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \dots + \vec{B}_n$

**Модуль индукции  $B$**  магнитного поля прямолинейного бесконечного проводника с током  $I$  на расстоянии  $R$  от него выражается соотношением

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R}.$$

**Модуль вектора** магнитной индукции тока  $I$  в центре кругового витка радиуса  $R$  равен

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

где  $\mu_0$  – постоянная величина, которую называют *магнитной постоянной*.

Ее численное значение равно  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Н/А}^2$ .

**Сила Лоренца** – это сила, действующая на заряженную частицу, движущуюся в магнитном поле. Модуль этой силы

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

$\alpha$  – угол между векторами  $v$  и  $B$ .

**Направление силы Лоренца определяется правилом левой руки.**

Если заряженная частица движется в однородном магнитном поле под действием силы Лоренца, а ее скорость  $\vec{v}$  лежит в плоскости, перпендикулярной вектору  $\vec{B}$ , то частица будет двигаться по окружности радиуса

$$R = \frac{mv}{qB}.$$

**Магнитный поток** (поток вектора магнитной индукции) через поверхность площадью  $S$

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos \alpha,$$

$\alpha$  – угол между направлением вектора магнитной индукции  $\vec{B}$  и нормалью  $\vec{n}$  к поверхности. Единица магнитного потока в системе СИ называется *вебером* (Вб). Магнитный поток, равный 1 Вб, создается магнитным полем с индукцией 1 Тл, пронизывающим по направлению нормали плоский контур площадью 1 м<sup>2</sup>.

**Закон электромагнитной индукции:** ЭДС индукции, возникающая в замкнутом контуре, равна по модулю и противоположна по знаку скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром:

$$\mathcal{E}_{\text{инд}} = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}.$$

**Правило Ленца:** что индукционный ток, возбуждаемый в замкнутом контуре при изменении магнитного потока, всегда направлен так, что создаваемое им магнитное поле препятствует изменению магнитного потока, вызывающего индукционный ток.

**ЭДС индукции в проводнике, движущемся** в постоянном во времени магнитном поле с индукцией  $B$

$$\mathcal{E}_{\text{инд}} = vB\ell \cdot \sin \alpha$$

где  $\ell$  – длина проводника;  $v$  – модуль его скорости;  $\alpha$  – угол между направлением вектора магнитной индукции  $\vec{B}$  и направлением скорости проводника.

**Магнитный поток** через поверхность, ограниченную контуром, возникающий при прохождении по этому контуру тока силой  $I$ ,

$$\Phi = LI,$$

где  $L$  – индуктивность контура.

**ЭДС самоиндукции**, возникающая в замкнутом контуре, прямо пропорциональна скорости изменения силы тока в нем:

$$\mathcal{E}_s = -L \frac{\Delta I}{\Delta t},$$

где  $\Delta I$  – изменение силы тока за время  $\Delta t$ .

**Энергия магнитного поля** тока силой  $I$ , проходящего по проводнику с индуктивностью  $L$ ,

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

### Механические колебания и волны

Координата (смещение от положения равновесия)  $x$  гармонически колеблющегося тела в момент времени  $t$  определяется формулой

$$x = x_m \cos (\omega t + \varphi_0).$$

Здесь  $x$  – смещение тела от положения равновесия,  $x_m$  – амплитуда колебаний, т. е. максимальное смещение от положения равновесия,  $\omega$  – *циклическая или круговая частота* колебаний,  $t$  – время.

Величина, стоящая под знаком косинуса  $\varphi = \omega t + \varphi_0$  называется **фазой** гармонического процесса. При  $t = 0$   $\varphi = \varphi_0$ , поэтому  $\varphi_0$  называют **начальной фазой**. Эта формула может быть записана также и с помощью синуса:

$$x = x_m \sin (\omega t + \varphi_1).$$

где  $\varphi_1 = \varphi_0 + \pi/2$ .

Минимальный интервал времени, через который происходит повторение движения тела, называется *периодом колебаний*  $T$ .

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

В СИ единица периода обращения – 1 *секунда* (1 с).  $[T] = 1 \text{ с}$ . **Частотой колебаний**  $\nu$ , называется число колебаний, совершаемых за единицу времени

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

Единица частоты – **герц** (Гц).

### Круговая (циклическая, угловая) частота колебаний

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

Для гармонического закона движения  $x = x_m \cos(\omega t + \varphi_0)$ . Вычисление производной приводит к следующему результату:

$$v = \dot{x}(t) = -\omega x_m \sin(\omega t + \varphi_0); \quad (v_{\max} = \omega x_{\max})$$

Аналогичным образом определяется ускорение  $a = a_x$  тела при гармонических колебаниях следовательно, ускорение  $a$  равно производной функции  $v(t)$  по времени  $t$ , или второй производной функции  $x(t)$ .

$$a = \dot{v}(t) = \ddot{x}(t) = -\omega^2 x_m \cos(\omega t + \varphi_0) = -\omega^2 x(t). \quad (a_{\max} = \omega^2 x_{\max})$$

Знак минус в этом выражении означает, что ускорение  $a(t)$  всегда имеет знак, противоположный знаку смещения  $x(t)$ , и, следовательно, по второму закону Ньютона сила, заставляющая тело совершать гармонические колебания, направлена всегда в сторону положения равновесия ( $x = 0$ ). Проекция силы, под действием которой тело совершает гармонические колебания

$$F_x = ma_x = -m\omega^2 x = -kx.$$

**Полная механическая энергия** колеблющегося тела

$$E = E_k + E_p$$

где  $E_k$  и  $E_p$  – соответственно кинетическая и потенциальная энергия.

**Период колебаний математического маятника**

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{\ell}{g}}$$

где  $\ell$  - длина маятника;  $g$  – ускорение свободного падения.

**Период колебаний пружинного маятника**

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

где  $m$  – масса груза, прикрепленного к пружине;  $k$  – жесткость (коэффициент упругости) пружины.

**Механические волны** бывают разных видов. Если при распространении волны частицы среды испытывают смещение в направлении, перпендикулярном направлению распространения, такая волна называется **поперечной**.

Если смещение частиц среды происходит в направлении распространения волны, такая волна называется **продольной**.

**Длиной волны**  $\lambda$  называют расстояние между двумя соседними точками на оси  $Ox$ , колеблющимися в одинаковых фазах. Расстояние, равное длине волны  $\lambda$ , волна пробегает за период  $T$ , следовательно,

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda\nu$$

где  $v$  – **скорость распространения** волны.

### Электromагнитные колебания и волны

Электрическая цепь, состоящая из конденсатора и катушки (LC – цепь), в которой могут происходить свободные колебания, называется **колебательным контуром**. Свободные электромагнитные колебания в контуре – это периодические изменения заряда, напряжения и силы тока в контуре без потребления энергии от внешних источников.

В отсутствие затухания свободные колебания в электрическом контуре являются **гармоническими**, то есть происходят по закону

$$q(t) = q_0 \cos(\omega t + \varphi_0).$$

**Период колебаний** (формула Томсона)

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

где,  $C$  – емкость конденсатора;  $L$  – индуктивность катушки.

При свободных колебаниях происходит периодическое превращение электрической энергии  $W_{\text{э}}$ , запасенной в конденсаторе, в магнитную энергию  $W_{\text{м}}$  катушки и наоборот. Если в колебательном контуре нет потерь энергии, то полная электромагнитная энергия системы остается неизменной:

$$W = W_{\text{э}} + W_{\text{м}} = \frac{q^2}{2C} + \frac{LI^2}{2} = \text{const.}$$

**Мгновенные значения** ЭДС  $e$ , напряжения  $u$  и силы тока  $i$  переменного тока соответственно равны:

$$e = \varepsilon_m \cdot \sin(\omega t + \varphi_0), \quad u = U_m \cdot \sin(\omega t + \varphi_0), \quad i = I_m \cdot \sin \omega t.$$

**Действующие значения** силы тока и напряжения определяют через

амплитудные значения этих величин: 
$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}; \quad U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}.$$

**Количество теплоты**, выделяемое проводником, активное сопротивление которого  $R$ , при прохождении по нему переменного тока в течение времени  $t$ ,

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

На индуктивном и емкостном сопротивлениях теплота не выделяется.

**Коэффициент трансформации** ненагруженного трансформатора

$$k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

где  $n_1$  и  $n_2$  – число витков в первичной и вторичной обмотках.

**Коэффициент трансформации** нагруженного трансформатора

$$k = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{U_1}{U_2 + I_2 R_{обм}} = \frac{n_1}{n_2}$$

**КПД трансформатора**

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{I_2 U_2}{I_1 U_1}.$$

**Длина волны**

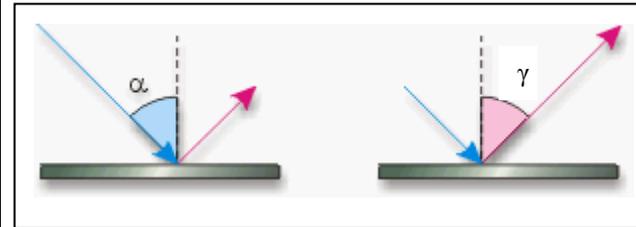
$$\lambda = cT,$$

где  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с – скорость электромагнитных волн в вакууме.

## Оптика

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

На границе раздела двух прозрачных сред свет может частично отразиться так, что часть световой энергии будет распространяться после отражения по новому направлению, а частично пройти через границу и распространяться во второй среде.



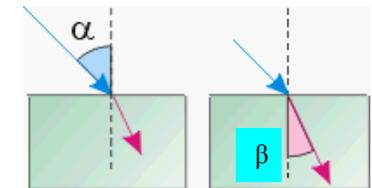
**Закон отражения света:** падающий и отраженный лучи, а также перпендикуляр к границе раздела двух сред, восстановленный в точке падения луча, лежат в одной плоскости (**плоскость**

**падения**). Угол отражения  $\gamma$  равен углу падения  $\alpha$ .

**Угол падения** – угол между падающим лучом и перпендикуляром к отражающей поверхности восстановленным в точке падения луча.

**Закон преломления света:** падающий и преломленный лучи, а также перпендикуляр к границе раздела двух сред, восстановленный в точке падения луча, лежат в одной плоскости. Отношение синуса угла падения  $\alpha$  к синусу угла преломления  $\beta$  есть величина, постоянная для двух данных сред:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n.$$



Постоянную величину  $n$  называют **относительным показателем преломления** второй среды относительно первой. Показатель преломления среды относительно вакуума называют **абсолютным показателем преломления**.

**Относительный показатель** преломления двух сред равен отношению их

абсолютных показателей преломления: 
$$n = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}$$

**Абсолютный показатель** преломления равен отношению скорости света  $c$  в вакууме к скорости света  $v$  в среде:

$$n = \frac{c}{v}.$$

**Формула тонкой линзы.** Если расстояние от предмета до линзы обозначить через  $d$ , а расстояние от линзы до изображения через  $f$ , то формулу тонкой линзы можно записать в виде:

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

Фокусным расстояниям линз принято приписывать определенные знаки: для собирающей линзы  $F > 0$ , для рассеивающей  $F < 0$ .

Величины  $d$  и  $f$  также подчиняются определенному правилу знаков:  $d > 0$  и  $f > 0$  – для действительных предметов (то есть реальных источников света, а не продолжений лучей, сходящихся за линзой) и изображений;  $d < 0$  и  $f < 0$  – для мнимых источников и изображений.

Оптическая сила линзы

$$D = \frac{1}{F}$$

И измеряется в диоптриях (дптр).

**Оптическая сила  $D$  системы линз**, сложенных вплотную, равна алгебраической сумме оптических сил линз, входящих в систему:

$$D = D_1 + D_2 + \dots + D_n.$$

**Линейное увеличение линзы**

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

где  $H$ ,  $h$  – линейные размеры соответственно изображения и предмета.

**Увеличение лупы**

$$\Gamma = \frac{d_0}{F},$$

где  $d_0 = 25$  см – расстояние наилучшего видения для нормального глаза;  $F$  – фокусное расстояние лупы.

**Волновая оптика.**

**Длина волны  $\lambda$  света** определяется формулой

$$\lambda = \frac{v}{\nu},$$

где  $v$  – скорость распространения световой волны,  $\nu$  – ее частота.

**При переходе из одной среды в другую** – частота световой волны не изменяется, т.е.  $\nu_1 = \nu_2 = \nu = \text{const}$ .

При переходе из вакуума в среду с показателем преломления  $n$  длина волны уменьшается в  $n$  раз, т.е.

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n}, \text{ где } \lambda_0 \text{ и } \lambda \text{ – длины волн в вакууме и среде соответственно.}$$

Две световые волны являются **когерентными**, если они имеют одинаковую частоту и постоянную разность фаз.

**Условия максимумов и минимумов интерференции:**

1) **Светлые полосы** соответствуют максимумам интерференции и появляются при выполнении условия:

$$\Delta_{\max} = k\lambda. \quad k = 0, 1, 2, 3, \dots$$

2) **Темные полосы** соответствуют минимумам интерференции и появляются при выполнении условия:

$$\Delta_{\min} = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}. \quad k = 0, 1, 2, 3, \dots$$

$\Delta = |L_2 - L_1|$ , оптическая разность хода двух лучей.

$L = Sn$ ,  $S$  – геометрическая длина пути светового пучка,  $n$  – показатель преломления среды, в которой он распространяется.

**Условие главных максимумов освещенности при дифракции** на дифракционной решетке определяется формулой

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

где  $d$  – период решетки,  $\varphi$  – угол дифракции,  $k$  – порядок главных максимумов,  $\lambda$  – длина световой волны.

Максимальный угол отклонения лучей дифракционной решеткой равен  $90^\circ$ , т.е.  $\varphi_{\max} = 90^\circ$ . Следовательно, если в задаче требуется найти максимальный порядок дифракционного спектра, то вычисления производят по формуле

$$k_{\max} = \frac{d}{\lambda}$$

и после расчета оставляют целую часть полученного числа.

Для определения периода  $d$  дифракционной решетки иногда пользуются формулой

$$d = \frac{L}{N},$$

где  $N$  – число штрихов, нанесенных на участок дифракционной решетки длиной  $L$ .

### Специальная теория относительности.

В основе специальной теории относительности лежат два принципа или постулата, сформулированные Эйнштейном.

1. **Принцип относительности:** все законы природы инвариантны по отношению к переходу от одной инерциальной системы отсчета к другой. Это означает, что во всех инерциальных системах физические законы (не только механические) имеют одинаковую форму. Таким образом, принцип относительности классической механики обобщается на все процессы природы, в том числе и на электромагнитные. Этот обобщенный принцип называют **принципом относительности Эйнштейна**.

**2. Принцип постоянства скорости света:** скорость света в вакууме не зависит от скорости движения источника света или наблюдателя и одинакова во всех инерциальных системах отсчета. Скорость света в СТО занимает особое положение. Это предельная скорость передачи взаимодействий и сигналов из одной точки пространства в другую.

Промежуток времени между двумя событиями зависит от системы отсчета, т. е. является **относительным**. Собственное время  $\tau_0$  всегда меньше, чем промежуток времени между этими же событиями, измеренный в любой другой системе отсчета. Этот эффект называют **релятивистским замедлением времени**. Замедление времени является следствием инвариантности скорости света.

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

**Релятивистское сокращение длины:**  $l_0$  – длина тела в системе отсчета относительно которой тело покоится;  $l$  – длина тела в системе отсчета относительно которой тело движется со скоростью  $v$ .

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

**Релятивистский закон сложения скоростей.**

$$u_x = \frac{u'_x + v}{1 + \frac{v}{c^2} u'_x}$$

Принцип относительности Эйнштейна утверждает инвариантность всех законов природы по отношению к переходу от одной инерциальной системы отсчета к другой. В основу Эйнштейн положил требования выполнимости закона сохранения импульса и закона сохранения энергии в замкнутых системах. Для того, чтобы закон сохранения импульса выполнялся во всех инерциальных системах отсчета, оказалось необходимым изменить определение импульса тела. Вместо классического импульса  $\vec{p} = m\vec{v}$  в СТО **релятивистский импульс**  $\vec{p}$  тела с массой  $m$ , движущегося со скоростью  $\vec{v}$  записывается в виде

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

**Полная энергия  $E$**  движущейся частицы:

$$E = m = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (**)$$

**Энергия покоя  $E_0$ :**

$$E_0 = m_0 c^2. \quad (***)$$

Таким образом можно сделать вывод, что масса тела зависит от скорости:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Где  $m_0$  – масса покоящегося тела,  $m$  – масса движущегося тела.

Кинетическая энергия  $E_k$  релятивистской динамики есть разность между полной энергией  $E$  тела и его энергией покоя  $E_0$ :

$$E_k = E - E_0.$$

**Квантовая физика**

**Энергия фотона** равна  $E = h\nu$ ,

где  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка,  $\nu$  – частота света. Фотон движется в вакууме со скоростью  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с. Фотон не имеет массы покоя,  $m_0 = 0$  и обладает импульсом

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c}$$

**Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта:**

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{m v_{\text{max}}^2}{2},$$

где  $h\nu$  – энергия фотона;  $A_{\text{вых}}$  – работа выхода электрона;

$\frac{mv_{\max}^2}{2}$  - максимальная кинетическая энергия вылетающего электрона.

$$\frac{mv_{\max}^2}{2} = eU_3. \quad (U_3 - \text{задерживающее напряжение}).$$

### Красная граница фотоэффекта

$$v_{\min} = \frac{A}{h}, \quad \text{или} \quad \lambda_{\max} = \frac{hc}{A}.$$

Свет, падая на поверхность, оказывает на нее **давление**. При нормальном падении света на поверхность с коэффициентом отражения  $R$ , давление света  $p$  определяется соотношением  $p = \frac{E(1+R)}{c}$ ; где  $E$  – освещенность поверхности (энергия фотонов падающих на единицу площади поверхности в единицу времени),  $c$  – скорость света в вакууме.

### Атом и атомное ядро.

**Первый постулат Бора** (постулат стационарных состояний) гласит: атомная система может находиться только в особых *стационарных* или *квантовых* состояниях, каждому из которых соответствует определенная энергия  $E_n$ . В стационарных состояниях атом не излучает.

**Второй постулат Бора** (*правило частот*): при переходе атома из одного стационарного состояния с энергией  $E_n$  в другое стационарное состояние с энергией  $E_m$  излучается или поглощается квант, энергия которого равна разности энергий стационарных состояний:

$$h\nu_{nm} = E_n - E_m.$$

В 1890 году И. Ридберг получил эмпирическую формулу для частот спектральных линий:

$$\nu_{nm} = R \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right).$$

Для серии Бальмера  $m = 2, n = 3, 4, 5, \dots$ .

Для ультрафиолетовой серии (серия Лаймана)  $m = 1, n = 2, 3, 4, \dots$ .

Постоянная  $R$  в этой формуле называется *постоянной Ридберга*. Ее численное значение  $R = 3,29 \cdot 10^{15}$  Гц. До Бора механизм возникновения линейчатых спектров и смысл целых чисел, входящих в формулы спектральных линий водорода (и ряда других атомов), оставались непонятными.

**Третий постулат Бора** (*правило квантования орбит*): момент импульса электрона, вращающегося вокруг ядра, может принимать только дискретные значения, кратные постоянной Планка. Для круговых орбит правило квантования Бора записывается в виде

$$m_e v r_n = n \frac{h}{2\pi} \quad (n = 1, 2, 3, \dots).$$

Здесь  $m_e$  – масса электрона,  $v$  – его скорость,  $r_n$  – радиус стационарной круговой орбиты. Правило квантования Бора позволяет вычислить радиусы стационарных орбит электрона в атоме водорода и определить значения энергий. Самой близкой к ядру орбите соответствует значение  $n = 1$ . Радиус первой орбиты, который называется *боровским радиусом*, равен  $r_1 = 5,29 \cdot 10^{-11}$  м.

Радиусы последующих орбит возрастают пропорционально  $n^2$ .  $r_n = r_1 \cdot n^2$ ,

Целое число  $n = 1, 2, 3, \dots$  называется в квантовой физике атома *главным квантовым числом*.

**Энергия электрона находящегося на  $n$ -й орбите в атоме водорода:**  $E_n = \frac{E_1}{n^2}$ ,

где  $E_1 = -13,55$  эВ – энергия электрона на первой орбите.

В настоящее время твердо установлено, что **атомные ядра различных элементов состоят из двух частиц – протонов и нейтронов**.

Первая из этих частиц представляет собой атом водорода, из которого удален единственный электрон.

По современным измерениям, положительный заряд протона в точности равен элементарному заряду  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл, то есть равен по модулю отрицательному заряду электрона.

**Масса протона**, по современным измерениям, равна  $m_p = 1,67262 \cdot 10^{-27}$  кг. В ядерной физике массу частицы часто выражают в атомных единицах массы (а. е. м.), равной  $\frac{1}{12}$  массы атома углерода с массовым числом 12:

$$1 \text{ а. е. м.} = 1,66057 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

Следовательно,  $m_p = 1,007276$  а. е. м. Во многих случаях массу частицы удобно выражать в эквивалентных значениях энергии в соответствии с формулой  $E = mc^2$ .

Так как  $1 \text{ эВ} = 1,60218 \cdot 10^{-19}$  Дж, в энергетических единицах масса протона равна  $938,272331$  МэВ.

По современным измерениям, **масса нейтрона**  $m_n = 1,67493 \cdot 10^{-27}$  кг =  $1,008665$  а. е. м. В энергетических единицах масса нейтрона равна  $939,56563$  МэВ.

Масса нейтрона приблизительно на две электронные массы превосходит массу протона.

Протоны и нейтроны принято называть **нуклонами**.

Для характеристики атомных ядер вводится ряд обозначений. Число протонов, входящих в состав атомного ядра, обозначают символом  $Z$  и называют **зарядовым числом** или атомным номером (это порядковый номер в периодической таблице Менделеева). Заряд ядра равен  $Ze$ , где  $e$  – элементарный заряд. Число нейтронов обозначают символом  $N$ .

Общее число нуклонов (т. е. протонов и нейтронов) называют **массовым числом**  $A$ :

$$A = Z + N.$$

Ядра химических элементов обозначают символом  ${}^A_Z X$ , где  $X$  – химический символ элемента. Ядра одного и того же химического элемента могут отличаться числом нейтронов. Такие ядра называются **изотопами**.

### Энергия связи ядер

**Энергия связи ядра равна минимальной энергии, которую необходимо затратить для полного расщепления ядра на отдельные частицы.** Из закона сохранения энергии следует, что энергия связи равна той энергии, которая выделяется при образовании ядра из отдельных частиц. **Масса любого ядра  $M_{\text{я}}$  всегда меньше суммы масс входящих в его состав протонов и нейтронов:**

$$M_{\text{я}} < Zm_{\text{p}} + Nm_{\text{n}}.$$

Разность масс

$$\Delta M = Zm_{\text{p}} + Nm_{\text{n}} - M_{\text{я}}.$$

называется **дефектом массы**.

По дефекту массы можно определить с помощью **формулы Эйнштейна**  $E = mc^2$  энергию, выделившуюся при образовании данного ядра, т. е. энергию связи ядра  $E_{\text{св}}$ :

$$E_{\text{св}} = \Delta Mc^2 = (Zm_{\text{p}} + Nm_{\text{n}} - M_{\text{я}})c^2.$$

Эта энергия выделяется при образовании ядра в виде излучения  $\gamma$ -квантов.

Если масса ядер задана в а.е.м. то энергию связи атомного ядра можно будет выразить в мегаэлектронвольтах (МэВ) и вычислить по формуле:

$$E_{\text{св}} = 931,5(Zm_{\text{p}} + Nm_{\text{n}} - M_{\text{я}}).$$

Удельная энергия связи ядра  $\varepsilon$  (энергия приходящаяся на один нуклон) равна

$$\text{отношению энергии связи к массовому числу: } \varepsilon = \frac{E_{\text{св}}}{A}$$

### Радиоактивность

Почти 90 % из известных 2500 атомных ядер нестабильны. Нестабильное ядро самопроизвольно превращается в другие ядра с испусканием частиц. Это свойство ядер называется радиоактивностью. Было выяснено, что радиоактивные ядра могут испускать частицы трех видов: положительно и отрицательно заряженные и нейтральные. Эти три вида излучений были названы  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучениями. В магнитном поле  $\alpha$ - и  $\beta$ -лучи испытывают отклонения в противоположные стороны, причем  $\beta$ -лучи отклоняются значительно больше.  $\gamma$ -лучи в магнитном поле вообще не отклоняются.

Исследования показали, что  $\alpha$ -лучи представляют поток  $\alpha$ -частиц – ядер гелия  ${}^4_2\text{He}$ ,

$\beta$ -лучи – это поток электронов,  $\gamma$ -лучи представляют собой коротковолновое электромагнитное излучение с чрезвычайно малой длиной волны  $\lambda < 10^{-10}$  м и вследствие этого – ярко выраженными корпускулярными свойствами, т. е. является потоком частиц –  $\gamma$ -квантов.

Закон радиоактивного распада. В любом образце радиоактивного вещества содержится огромное число радиоактивных атомов. Так как радиоактивный распад имеет случайный характер и не зависит от внешних условий, то закон убывания количества  $N(t)$  нераспавшихся к данному моменту времени  $t$  ядер может служить важной статистической характеристикой процесса радиоактивного распада.

$$N = N_0 2^{\frac{-t}{T}}$$

где  $N_0$  – начальное число радиоактивных ядер при  $t = 0$ .  $T$  – период полураспада – время за которое число нераспавшихся ядер уменьшается в 2 раза.