

1. МЕХАНИКА

1.1. Кинематика

Механическое движение и его характеристики

Изучение курса физики принято начинать с механики. Механика изучает самый простой и наглядный вид движения — механическое движение.

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, остается 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.

По виду траектории различают *прямолинейное* и *криволинейное* движения (частный случай криволинейного движения — движение по окружности); по скорости — *равномерное* и *неравномерное*; по ускорению — *равноускоренное*, *равнозамедленное*, *ускоренное*.

Основная задача механики — определять положение тела в пространстве в любой момент времени.

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.

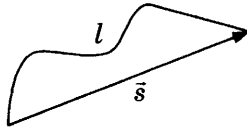
Систему отсчета вводят для того, чтобы задать положение материальной точки в пространстве. В нее входят: тело отсчета (любое тело), система координат (одномерная, двухмерная или трехмерная) и часы (начало отсчета времени совпадает с началом движения тела).

Решить основную задачу механики — определить координаты тела в любой момент времени.

Траектория — линия, вдоль которой движется тело.

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.



Проекция вектора перемещения на оси координат

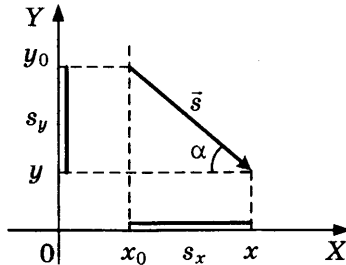
Проекция вектора перемещения на ось OX :

$$s_x = x - x_0.$$

Проекция вектора перемещения на ось OY :

$$s_y = y - y_0.$$

Проекция вектора на ось равна нулю, если вектор перпендикулярен оси.



Знаки проекций перемещения: проекцию считают *положительной*, если движение от проекции начала вектора к проекции конца происходит по направлению оси, и *отрицательной*, если — против оси. В данном примере $s_x > 0$; $s_y < 0$.

Модуль перемещения — это длина вектора перемещения:

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

По теореме Пифагора:

$$s = \sqrt{s_x^2 + s_y^2} \quad \text{или} \quad s = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}.$$

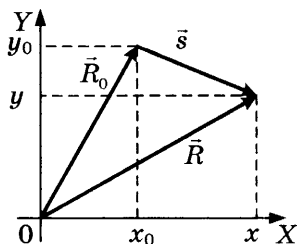
Проекция перемещения и угол наклона

$$s_x = \pm s \cos \alpha; \quad s_y = \pm s \sin \alpha.$$

В данном примере: $s_x = s \cos \alpha$; $s_y = -s \sin \alpha$.

Уравнение координаты (в общем виде):

$$x = x_0 + s_x \text{ или } y = y_0 + s_y.$$



Радиус-вектор — вектор, начало которого совпадает с началом координат, а конец — с положением тела в данный момент времени. Проекции радиус-вектора на оси координат определяют координаты тела в данный момент времени.

Радиус-вектор позволяет задать положение материальной точки в заданной системе отсчета:

$$\vec{s} = \Delta \vec{R} = \vec{R} - \vec{R}_0.$$

Равномерное прямолинейное движение

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:

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

В проекциях на ось OX :

$$v_x = \frac{s_x}{t} = \frac{\Delta x}{\Delta t}.$$

Дополнительные единицы измерения скорости:

$$1 \text{ км/ч} = 1000 \text{ м}/3600 \text{ с},$$

$$1 \text{ км/с} = 1000 \text{ м/с},$$

$$1 \text{ см/с} = 0,01 \text{ м/с},$$

$$1 \text{ м/мин} = 1 \text{ м}/60 \text{ с}.$$

Измерительный прибор — *спидометр* — показывает модуль скорости.

Знак проекции скорости зависит от направления вектора скорости и оси координат:

$$\begin{array}{c} \vec{v}_2 = 2 \text{ м/с} \quad \vec{v}_2 = 3 \text{ м/с} \\ \xrightarrow{\hspace{1.5cm}} \quad \xleftarrow{\hspace{1.5cm}} \\ v_{1x} = 2 \text{ м/с}; v_{2x} = -3 \text{ м/с} \quad X \end{array}$$

График проекции скорости представляет собой зависимость проекции скорости от времени.

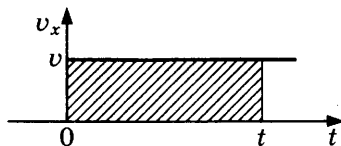


График скорости при равномерном прямолинейном движении — прямая, параллельная оси времени (1, 2, 3).

Если график лежит над осью времени (1), то тело движется по направлению оси OX . Если график расположен под осью времени, то тело движется против оси OX (2, 3).

Чем дальше график от оси времени, тем больше модуль скорости (3).

Геометрический смысл перемещения.



При равномерном прямолинейном движении перемещение определяют по формуле $s = v \cdot t$. Такой же результат получим, если вычислим площадь фигуры под графиком скорости в осях (v_x, t) . Значит, для определения пути и модуля перемещения при прямолинейном движении необходимо вычислять площадь фигуры под графиком скорости в осях (v_x, t) :

$$s = S_{\text{фигуры}}.$$

График проекции перемещения — зависимость проекции перемещения от времени.

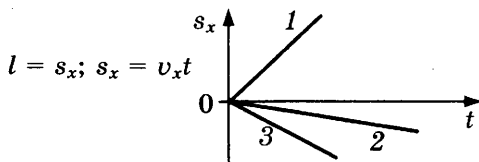


График проекции перемещения *при равномерном прямолинейном движении* — прямая, выходящая из начала координат (1, 2, 3).

Если прямая (1) лежит над осью времени, то тело движется по направлению оси OX , а если под осью (2, 3), то против оси OX .

Чем больше тангенс угла наклона (1) графика, тем больше модуль скорости.

График координаты — зависимость координаты тела от времени:

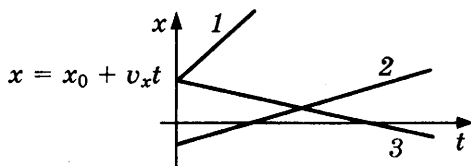


График координаты при равномерном прямолинейном движении — прямые (1, 2, 3).

Если с течением времени координата увеличивается (1, 2), то тело движется по направлению оси OX ; если координата уменьшается (3), то тело движется против направления оси OX .

Чем больше тангенс угла наклона (1), тем больше модуль скорости.

Если графики координат двух тел пересекаются, то из точки пересечения следует опустить перпендикуляры на ось времени и ось координат.

Относительность механического движения

Под относительностью мы понимаем зависимость чего-либо от выбора системы отсчета. Например, покой относительно; движение относительно и положение тела относительно.

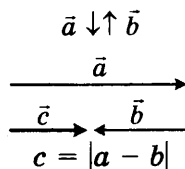
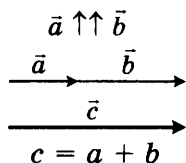
Правило сложения перемещений. Векторная сумма перемещений

$$\vec{s}' = \vec{s}_1 + \vec{s}_2,$$

где \vec{s}_1 — перемещение тела относительно подвижной системы отсчета (ПСО); \vec{s}_2 — перемещение ПСО относительно неподвижной системы отсчета (НСО); \vec{s}' — перемещение тела относительно неподвижной системы отсчета (НСО).

Векторное сложение: $\vec{c} = \vec{a} + \vec{b}$.

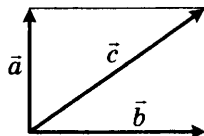
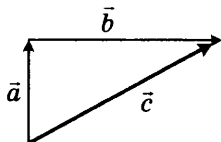
Сложение векторов, направленных вдоль одной прямой:



Сложение векторов, перпендикулярных друг другу ($\vec{a} \perp \vec{b}$):

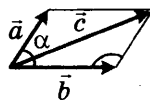
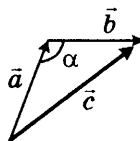
Правило треугольника

Правило параллелограмма



По теореме Пифагора $c = \sqrt{a^2 + b^2}$

Сложение векторов, расположенных под углом α друг к другу:



По теореме косинусов

По теореме косинусов

$$c = \sqrt{a^2 + b^2 - 2ab \cos \alpha}$$

$$c = \sqrt{a^2 + b^2 - 2ab \cos(180^\circ - \alpha)}$$

Правило сложения скоростей. Векторная сумма скоростей:

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

где \vec{v} — скорость тела относительно подвижной системы отсчета (ПСО); \vec{u} — скорость ПСО относительно неподвижной системы отсчета (НСО); \vec{v}' — скорость тела относительно неподвижной системы отсчета (НСО).

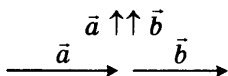
Относительная скорость. Векторная разность скоростей:

$$\vec{v}_{\text{отн}} = \vec{v}_1 - \vec{v}_2 = \vec{v}_{12},$$

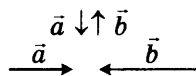
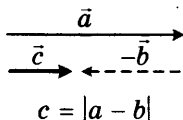
где $\vec{v}_{\text{отн}}$ — скорость первого тела относительно второго (относительная скорость); \vec{v}_1 — скорость первого тела; \vec{v}_2 — скорость второго тела.

Векторное вычитание: $\vec{c} = \vec{a} - \vec{b} = \vec{a} + (-\vec{b})$.

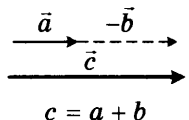
Вычитание векторов, направленных по одной прямой:



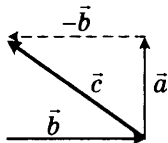
Построение:



Построение:

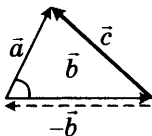


Вычитание векторов, перпендикулярных друг другу ($\vec{a} \perp \vec{b}$):



По теореме Пифагора $c = \sqrt{a^2 + b^2}$

Вычитание векторов, расположенных под углом α друг к другу:



По теореме косинусов $c = \sqrt{a^2 + b^2 - 2ab \cos \alpha}$

Средняя скорость

Неравномерное движение — движение с переменной скоростью. Это самый распространенный вид движения.

Средняя скалярная (путевая) скорость:

$$v_{\text{сп}} = \frac{l}{t},$$

где l — весь путь; t — все время.

Средняя векторная скорость:

$$\vec{v}_{\text{сп}} = \frac{\vec{s}}{t},$$

где \vec{s} — все перемещение; t — все время пути.

Средняя скалярная скорость и модуль средней векторной скорости:

$$v_{\text{сп}} \geq |\vec{v}_{\text{сп}}|.$$

Равноускоренное прямолинейное движение

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

Ускорение \vec{a} (м/с²) — векторная физическая величина, показывающая, на сколько изменяется скорость тела за 1 с.

В векторном виде:

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

В проекциях на ось OX :

$$a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{t}.$$

Измерительный прибор — *акселерометр*.

Знаки проекции ускорения зависят от направления вектора ускорения и оси OX (например, $\vec{v}_0 \uparrow \uparrow OX$):

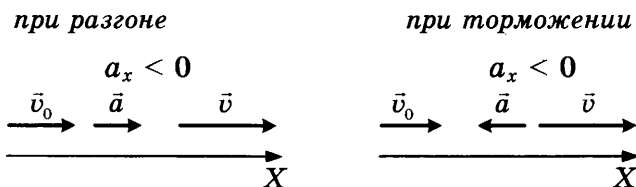


График ускорения — зависимость проекции ускорения от времени:

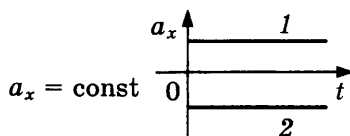


График ускорения при *равноускоренном прямолинейном движении* — прямая, параллельная оси времени (1, 2).

Чем дальше график от оси времени (2), тем больше модуль ускорения.

Мгновенная скорость — скорость в данный момент времени или в данном месте пространства.

Скорость при равноускоренном прямолинейном движении.

В векторном виде: $\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t$.

В проекциях на ось OX : $v_x = v_{0x} + a_x t$.

С учетом знака ускорения («+» разгон, «-» торможение):

$$v = v_0 \pm at.$$

График мгновенной скорости — зависимость проекции скорости от времени.

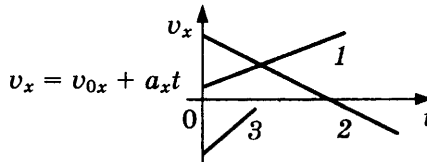


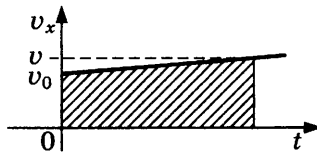
График скорости при *равноускоренном прямолинейном движении* — прямая (1, 2, 3).

Если график располагается над осью времени (1), то тело движется по направлению оси OX .

Чем больше тангенс угла наклона графика (3), тем больше модуль ускорения.

Если график пересекает ось времени (2, 3), то на первом этапе тело тормозило, а на втором двигалось ускоренно в противоположную сторону.

Геометрический смысл перемещения.



Для определения модуля перемещения при равноускоренном прямолинейном движении вычислим площадь фигуры под графиком скорости в осях (v_x , t), т. е. найдем площадь трапеции

$$s = S_{\text{трап.}} = \frac{(v_0 + v)t}{2}.$$

Основные формулы для определения кинематических величин равноускоренного прямолинейного движения:

Ускорение: $\pm a = \frac{v - v_0}{t}.$

Мгновенная скорость: $v = v_0 \pm at.$

Время движения: $t = \frac{v - v_0}{\pm a}.$

Перемещение:

$$s = \frac{(v + v_0)t}{2} \text{ (без ускорения),}$$

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

$$s = \frac{v^2 - v_0^2}{\pm 2a} \text{ (без времени).}$$

Перемещение в n -ю секунду равноускоренного прямолинейного движения:

$$s_n = s(n) - s(n-1),$$

где $s(n) = v_0 n \pm \frac{an^2}{2}$;

$$s(n-1) = v_0(n-1) \pm \frac{a(n-1)^2}{2}.$$

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

Уравнение координаты:

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

Уравнение скорости:

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

Средняя скорость:

$$v_{cp} = \frac{\Delta x}{\Delta t}.$$

Совместное движение двух тел.

Уравнение координаты:

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

Уравнение координаты при запаздывании:

$$x = x_0 + v_{0x}(t - t_{\text{запазд}}) + \frac{a_x(t - t_{\text{запазд}})^2}{2}.$$

Уравнение координаты при опережении:

$$x = x_0 + v_{0x}(t + t_{\text{опер}}) + \frac{a_x(t + t_{\text{опер}})^2}{2}.$$

Расстояние между двумя телами:

$$r = |x_1 - x_2|.$$

Координаты двух тел в момент встречи:

$$x_1 = x_2.$$

Графики кинематических величин прямолинейного движения

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

Свободное падение

- Свободное падение происходит под действием только силы тяжести.
- Свободное падение — свободно от сопротивления воздуха.
- 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 $g = 10 \text{ м/с}^2$.

- Свободное падение по вертикали — пример равноускоренного прямолинейного движения.
- В задачах на свободное падение единицы измерения всех величин сразу следует переводить в СИ.

Основные формулы для определения кинематических величин при свободном падении (вертикальный бросок).

Скорость: $v = v_0 \pm gt$.

Перемещение, высота:

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

Перемещение в n -ю секунду свободного падения:

$$s_n = s(n) - s(n - 1),$$

где $s(n) = \frac{gn^2}{2}$; $s(n - 1) = \frac{g(n - 1)^2}{2}$.

Уравнение координаты при свободном падении позволяет определить кинематические величины свободного падения даже в тех случаях, когда направление движения изменяется.

Уравнение координаты позволяет определить высоту тела в любой момент времени:

$$y = y_0 + v_{0y}t + \frac{g_y t^2}{2}.$$

Уравнение скорости:

$$v_y = v_{0y} + g_y t.$$

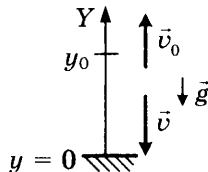
Модуль перемещения тела:

$$s = |y - y_0|.$$

Свободное падение на землю с некоторой высоты (начальная скорость направлена вверх).

Уравнение координаты: $0 = y_0 + v_0 t_{\text{нал}} - \frac{gt_{\text{нал}}^2}{2}$.

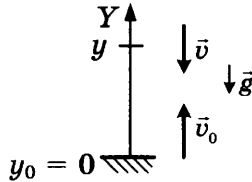
Уравнение скорости: $-v = v_0 - gt_{\text{нал}}$.



Тело подбросили от земли и поймали на некоторой высоте.

Уравнение координаты: $y = v_0 t - \frac{gt^2}{2}$.

Уравнение скорости: $-v = v_0 - gt$.



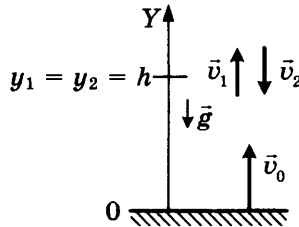
Тело подбросили от земли, на одной и той же высоте оно побывало дважды.

Уравнение координаты при подъёме: $y_1 = v_0 t_1 - \frac{gt_1^2}{2}$.

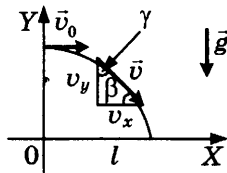
Уравнение координаты при спуске: $y_2 = v_0 t_2 - \frac{gt_2^2}{2}$.

Интервал времени между моментами прохождения высоты h :

$$\Delta t = t_2 - t_1.$$



Горизонтальный бросок.



Проекции начальной скорости: $v_{0x} = v_0$; $v_{0y} = 0$.

Проекции ускорения свободного падения: $g_x = 0$; $g_y = -g$.

Проекции мгновенной скорости: $v_x = v_0$; $v_y = -gt$.

Модуль мгновенной скорости: $v = \sqrt{v_0^2 + (gt)^2}$.

Минимальная скорость, начальная скорость: v_0 .

Максимальная скорость, конечная скорость (при падении): v .

Угол наклона вектора скорости к горизонту: $\operatorname{tg} \beta = \frac{v_y}{v_x} = \frac{gt}{v_0}$.

Угол наклона вектора скорости к вертикали: $\operatorname{tg} \gamma = \frac{v_x}{v_y} = \frac{v_0}{gt}$.

Горизонтальное смещение: $x = x_0 + v_{0x}t + \frac{g_x t^2}{2}$, $\dot{x} = v_0 t$.

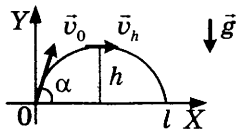
Мгновенная высота: $y = y_0 + v_{0y}t + \frac{g_y t^2}{2}$, $y = h_0 - \frac{gt^2}{2}$.

Время падения ($y = 0$): $t_{\text{пад}} = \sqrt{\frac{2h_0}{g}}$.

Дальность полета: $l = v_0 t_{\text{пад}} = v_0 \sqrt{\frac{2h_0}{g}}$.

Уравнение траектории: $y(x) = h_0 - \frac{g}{2} \left(\frac{x}{v_0} \right)^2$.

Бросок под углом к горизонту.



Проекции начальной скорости: $v_{0x} = v_0 \cos \alpha$; $v_{0y} = v_0 \sin \alpha$.

Проекции ускорения свободного падения: $g_x = 0$; $g_y = -g$.

Проекции мгновенной скорости: $v_x = v_0 \cos \alpha$; $v_y = v_0 \sin \alpha - gt$.

Модуль мгновенной скорости:

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}, \quad v = \sqrt{v_0^2 - 2v_0 \sin \alpha \cdot gt + g^2 t^2}.$$

Минимальная скорость, скорость в верхней точке траектории:

$$v_{\min} = v_0 \cos \alpha = v_h.$$

Максимальная скорость, начальная скорость, конечная скорость: $v_{\max} = v_0 = v$.

Угол наклона вектора мгновенной скорости к горизонту:

$$\operatorname{tg} \beta_1 = \frac{v_y}{v_x} = \frac{v_0 \sin \alpha - gt_1}{v_0 \cos \alpha}, \quad \operatorname{tg} \beta_2 = \frac{v_y}{v_x} = \frac{-(v_0 \sin \alpha - gt_2)}{v_0 \cos \alpha}.$$

Угол наклона вектора скорости к вертикали:

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

Горизонтальное смещение: $x = x_0 + v_{0x}t + \frac{g_x t^2}{2}$, $x = v_0 \cos \alpha t$.

Мгновенная высота: $y = y_0 + v_{0y}t + \frac{g_y t^2}{2}$, $y = v_0 \sin \alpha t - \frac{gt^2}{2}$.

Время подъема ($v_y = 0$): $t_{\text{под}} = \frac{v_0 \sin \alpha}{g}$.

Полное время (время полета): $t_{\text{полн}} = 2t_{\text{под}} = \frac{2v_0 \sin \alpha}{g}$.

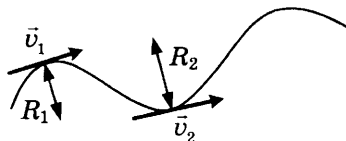
Наибольшая высота подъема: $h = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g}$.

Дальность полета: $l = \frac{v_0^2 2 \sin \alpha \cos \alpha}{g} = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g}$.

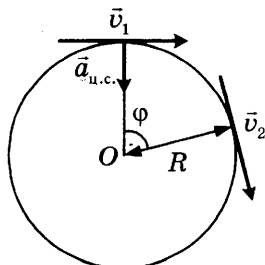
Уравнение траектории: $y(x) = x \operatorname{tg} \alpha - \frac{gx^2}{2v_0^2 \cos^2 \alpha}$.

Движение по окружности с постоянной по модулю скоростью

Криволинейное движение — движение, траекторией которого является кривая линия. Вектор скорости в любой момент времени направлен по касательной к траектории.



Движение по окружности с постоянной по модулю скоростью — простейший вид криволинейного движения. Любой участок криволинейного движения можно представить в виде движения по дуге окружности или по участку ломаной. Это движение с переменным ускорением.



- Траектория движения — окружность.

- Вектор скорости всегда направлен по касательной к окружности.
- Направление скорости постоянно изменяется.
- Ускорение, которое изменяет направление скорости, называют центростремительным.
- Центростремительное ускорение не меняет модуля скорости.
- Центростремительное ускорение направлено к центру окружности.

Величины, характеризующие движение по окружности с постоянной по модулю скоростью.

Период T (с) — время одного полного оборота:

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

Частота ν (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:

$$v = \frac{l}{t} = \frac{2\pi R}{T} = 2\pi R\nu = \frac{2\pi RN}{t} = \omega R.$$

Угловая скорость ω (рад/с) показывает, на какой угол поворачивает тело за 1 с:

$$\omega = \frac{\varphi}{t} = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu = \frac{2\pi N}{t} = \frac{v}{R}.$$

Центростремительное ускорение $a_{ц.с.}$ (м/с²) изменяет направление вектора скорости:

$$a_{ц.с.} = \frac{v^2}{R} = \omega^2 R = \frac{4\pi^2 R}{T^2} = 4\pi^2 R\nu^2.$$

Число оборотов N — число полных оборотов за время t :

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

Путь l (м) — расстояние, пройденное телом.

Длина дуги:

$$l = \frac{\pi R}{180^\circ} \cdot \alpha^\circ.$$

Тело совершило N оборотов: $l = N2\pi R$.

Величины, характеризующие криволинейное движение

Название, обозначение, единица измерения	Направление	Формула	Для свободного падения
			
Касательное (или тангенциальное) ускорение a_τ (м/с ²)	Параллельно скорости $\vec{a}_\tau \parallel \vec{v}$	Изменяет модуль скорости $a_\tau = \frac{v - v_0}{t}$	Движение вверх $a_\tau = -g \cos \gamma$ Движение вниз $a_\tau = g \cos \gamma$
Нормальное (или центростремительное) ускорение a_n (м/с ²)	Перпендикулярно скорости $\vec{a}_n \perp \vec{v}$	$a_n = \frac{v^2}{R}$	$a_n = g \sin \gamma$
Полное ускорение $a_{\text{полн}}$ (м/с ²)	Находится геометрически	$a_{\text{полн}} = \sqrt{a_\tau^2 + a_n^2}$	$a_{\text{полн}} = g$
Радиус кривизны R (м)	$R \perp v$	$R = \frac{v^2}{a_n}$ v — скорость в данный момент времени	В верхней точке $a_n = g$ $R = \frac{(v_0 \cos \alpha)^2}{g}$
Путь l (м)		$l = v_0 t + \frac{a_\tau t^2}{2}$	

1.2. Динамика

Три закона Ньютона

Динамика изучает причины движения тел и способы определения ускорения.

Инерция — явление, при котором тело сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения (т.е. в этих случаях отсутствует ускорение).

Инерциальные системы отсчета — системы отсчета, 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 отсчета, называемые инерциальными, относительно которых*

тела движутся равномерно и прямолинейно, 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).

Проявление инертности чаще всего наблюдается в движущемся транспорте. Например, при резком увеличении скорости все пассажиры отклоняются назад, при торможении — вперед, при повороте направо все отклоняются налево и т. п.

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

Измерительный прибор — весы.

Дополнительные единицы измерения:

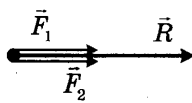
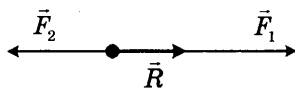
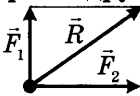
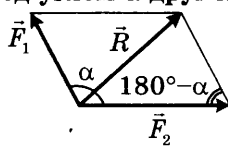
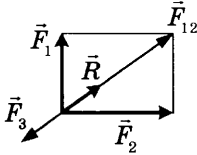
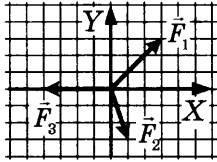
$$1 \text{ т} = 1000 \text{ кг}, 1 \text{ ц} = 100 \text{ кг}, 1 \text{ г} = 0,001 \text{ кг}.$$

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 (кроме веса) является *центр тяжести тела*. Измерительный прибор — динамометр.

Три закона Ньютона справедливы только в инерциальных системах отсчета.

Когда следует использовать	Формулировка	Формула
Первый закон Ньютона		
Тело находится в состоянии покоя или движется равномерно и прямолинейно	Тело находится в состоянии покоя или движется по прямой с постоянной скоростью ($a = 0$), если на тело не действуют силы или их векторная сумма равна нулю	$\Sigma \vec{F}_i = \vec{0}$
Второй закон Ньютона		
Тело движется с ускорением <i>Всегда</i> $\vec{a} \uparrow \vec{F}$ или $\vec{a} \uparrow \vec{R}$	<ul style="list-style-type: none"> Сила, действующая на тело, равна произведению массы этого тела на ускорение, которое сообщает эта сила Если на тело действуют несколько сил, то их равнодействующая \vec{R} будет равна произведению массы на ускорение 	$\vec{F} = m\vec{a}$ $\vec{R} = m\vec{a}$, где $\vec{R} = \Sigma \vec{F}_i$
Третий закон Ньютона		
Тело взаимодействует с другими телами	Тела действуют друг на друга с силами, направленными вдоль одной прямой, противоположными по направлению и равными по модулю	$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$

Равнодействующая сила — векторная сумма всех сил, действующих на тело: $\vec{R} = \Sigma \vec{F}_i$.

Сложение двух сил, направленных вдоль одной прямой	
<p>В одном направлении</p>  <p>Если $\vec{F}_1 \uparrow \vec{F}_2$, то $R = F_1 + F_2$</p>	<p>В противоположном направлении</p>  <p>Если $\vec{F}_1 \downarrow \vec{F}_2$, то $R = F_1 - F_2$</p>
<p>Сложение двух сил, перпендикулярных друг другу</p>  <p>Если $\vec{F}_1 \perp \vec{F}_2$, то по теореме Пифагора</p> $R = \sqrt{F_1^2 + F_2^2}$	<p>Сложение двух сил, расположенных под углом α друг к другу</p>  <p>По теореме косинусов</p> $R = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 - 2F_1F_2 \cos(180^\circ - \alpha)}$
<p>Сложение трех сил</p>  <p>$F_{12} = \sqrt{F_1^2 + F_2^2}$ $R = F_{12} - F_3$</p>	<p>Сложение проекций сил</p>  <p>$OX: F_{1x} + F_{2x} - F_{3x} = 0$ $OY: F_{1y} - F_{2y} = 0$ $R = 0$</p>

Сила всемирного тяготения

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

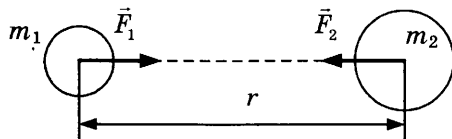
Закон всемирного тяготения выполняется для материальных точек и сферических тел.

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:

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

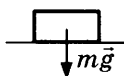
где $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$ — гравитационная постоянная, численно равная силе гравитационного притяжения двух тел массой по 1 кг каждое, находящихся на расстоянии 1 м одно от другого; r — расстояние между центрами тел.

Сила всемирного тяготения направлена по линии, соединяющей центры тел.

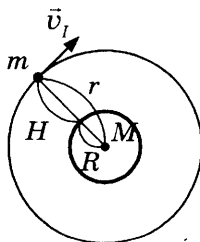


Сила тяжести

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



Искусственный спутник планеты — тело, которое обращается вокруг планеты. Движение искусственных спутников происходит по эллипсам, но мы будем рассматривать упрощенный частный случай — движение по окружности. Линейную скорость такого движения называют *первой космической скоростью*.



M — масса планеты, m — масса спутника, R — радиус планеты, H — высота спутника над поверхностью планеты, r — расстояние от центра планеты до спутника ($r = R + H$ — *радиус орбиты*), v_1 — первая космическая скорость спутника.

Закон движения ИСЗ — второй закон Ньютона:

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

	Сила тяжести	Ускорение свободного падения	Первая космическая скорость	Период обращения спутника	Угловая скорость	Частота
Второй закон Ньютона		$a_{\text{уч.с.}} = g$ $\frac{GMm}{(R+H)^2} = mg$	$a_{\text{уч.с.}} = \frac{v^2}{r}$ $\frac{GMm}{(R+H)^2} = \frac{mv^2}{R+H}$	выска $a_{\text{уч.с.}} = \frac{4\pi^2 r}{T^2}$ $\frac{GMm}{(R+H)^2} = \frac{m4\pi^2(R+H)}{T^2}$	$a_{\text{уч.с.}} = \omega^2 r$ $\frac{GMm}{(R+H)^2} = m\omega^2(R+H)$	$a_{\text{уч.с.}} = 4\pi^2 \nu^2 r$ $\frac{GMm}{(R+H)^2} = m4\pi^2 \nu^2 (R+H)$
На высоте $H \neq 0$; $r = R + H$	$F_{\text{тяж}} = \frac{GMm}{(R+H)^2} = \frac{GMm}{r^2}$	$g = \frac{GM}{(R+H)^2} = \frac{GM}{r^2}$	$v_1 = \sqrt{\frac{GM}{R+H}} = \sqrt{\frac{GM}{r}}$ $v_1 = \sqrt{\frac{2\pi GM}{T}}$	$T = 2\pi \sqrt{\frac{(R+H)^3}{GM}} = 2\pi \sqrt{\frac{r^3}{GM}}$	$\omega = \sqrt{\frac{GM}{(R+H)^3}} = \sqrt{\frac{GM}{r^3}}$	$\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{GM}{(R+H)^3}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{GM}{r^3}}$
На поверхности планеты $H = 0$	$F_{\text{тяж}} = mg_0 = \frac{GMm}{R^2}$	$g_0 = \frac{GM}{R^2}$	$v_1 = \sqrt{\frac{GM}{R}}$	$T = 2\pi \sqrt{\frac{R^3}{GM}}$	$\omega = \sqrt{\frac{GM}{R^3}}$	$\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{GM}{R^3}}$
С учётом плотности планеты $H = 0$; $M = \rho \cdot \pi R^3$		$g_0 = \frac{4}{3} \pi R \rho$	$v_1 = 2R \sqrt{\frac{G \rho \pi}{3}}$	$T = \frac{3\pi}{\sqrt{G \rho}}$	$\omega = 2 \sqrt{\frac{G \rho \pi}{3}}$	$\nu = \sqrt{\frac{G \rho}{3\pi}}$
Если не указана масса планеты, то $GM = g_0 R^2$			$v_1 = \sqrt{\frac{g_0 R^2}{(R+H)}} = \sqrt{\frac{g_0 R^2}{r}}$	$T = 2\pi \sqrt{\frac{(R+H)^3}{g_0 R^2}} = 2\pi \sqrt{\frac{r^3}{g_0 R^2}}$	$\omega = \sqrt{\frac{g_0}{R}}$	$\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g_0 R^2}{r^3}}$
Для Земли		$g_0 = 9,8 \text{ м/с}^2 \approx 10 \text{ м/с}^2$	$v_1 = 7,9 \text{ км/с}$	$T = 24 \text{ ч} = 86400 \text{ с}$ Стационарный спутник $T_{\text{спутника}} = T_{\text{планеты}}$		

Сила упругости

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

Деформация — изменение формы или объема 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.

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

$$F_{\text{упр}} = kx,$$

где k — жесткость тела, зависящая от его размеров, формы и материала. Единица измерения — ньютон на метр (Н/м).

Закон Гука выполняется только для упругих деформаций.

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

Сила реакции опоры (\vec{N}) всегда перпендикулярна опоре.

Сила натяжения нити (\vec{T}) всегда направлена вдоль оси подвеса.

Архимедова сила (\vec{F}_A) всегда противоположна силе тяжести.

Основные понятия и физические величины, характеризующие деформацию тел.

Деформация или абсолютное удлинение тела x (м):

$$x = |l - l_0| = \Delta l,$$

где l_0 — начальная длина тела, l — длина деформированного тела.

Относительное удлинение тела ε :

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}.$$

Механическое напряжение σ (Н/м² = Па):

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

Экспериментальный факт: $\sigma = E\varepsilon$,

где E (Н/м² = Па) — модуль упругости (модуль Юнга) — характеризует сопротивляемость материала упругой деформации растяжения или сжатия.

Жесткость пружины k (Н/м):

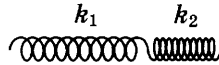
$$k = \frac{ES}{l_0}.$$

Параллельное соединение пружин:



$$k_{\text{пар}} = k_1 + k_2; x = x_1 = x_2; F = F_1 + F_2.$$

Последовательное соединение пружин:



$$\frac{1}{k_{\text{посл}}} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2},$$

$$x = x_1 + x_2, F = F_1 = F_2.$$

Силы трения

Сила трения возникает при движении тел или при попытке сдвинуть их с места. Она действует на поверхности тел и затрудняет их перемещение относительно друг друга. 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 ($\vec{F}_{\text{тр.ск.}} \uparrow \downarrow \vec{v}$):

$$F_{\text{тр.ск.}} = \mu N,$$

где μ — коэффициент трения.

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

Учтите: если движение происходит по гладкой поверхности, то силу трения учитывать не надо; если тело преодолевает границу между гладкой и шероховатой поверхностью, то сила трения равна

$$F_{\text{тр.}} = \frac{\mu mg}{2}.$$

Трение покоя возникает при попытке сдвинуть предмет с места. Трение покоя противоположно приложенной силе или направлению возможного движения.

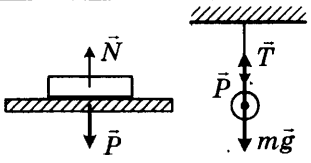
Жидкое трение (сила сопротивления) возникает при движении в жидкостях и газах. Направление жидкого трения противоположно скорости движения ($\vec{F}_{\text{сопр}} \uparrow \downarrow \vec{v}$). Особенности: жидкое трение зависит от формы тел.

При малых скоростях: $F_{\text{сопр}} = kv$; при больших скоростях: $F_{\text{сопр}} = kv^2$.

Коэффициент пропорциональности k зависит от формы и размеров тела, состояния его поверхности и от свойств среды.

Вес тела

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).

Точка приложения — точка опоры или подвеса	
Направление	Вес имеет направление, противоположное силе реакции опоры или силе натяжения нити $\vec{P} \uparrow \downarrow \vec{N}; \vec{P} \uparrow \downarrow \vec{T}$
Способ определения модуля веса	По третьему закону Ньютона $P = N$, или $P = T$, или $P = F_{\text{упр}}$
Вес тела, если тело и опора (подвес) неподвижны	$P_0 = mg$
Невесомость	$P = 0$
Перегрузка	$\frac{P}{P_0} = \frac{P}{mg}$

1.3. Законы сохранения

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, так как $m > 0$ ($\vec{v} \uparrow \uparrow \vec{p}$).

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

Суммарный (полный) импульс системы тел — векторная сумма импульсов всех тел: $\vec{p} = \sum \vec{p}_i$.

Изменение импульса тела — векторная разность между конечным и начальным импульсом тела:

$$\Delta \vec{p} = \vec{p} - \vec{p}_0 = \vec{p} + (-\vec{p}_0).$$

Второй закон Ньютона:

$$\vec{F} = m\vec{a}, \quad \vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{\Delta t},$$

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

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

где $\vec{F}\Delta t$ — импульс силы, $\Delta \vec{p}$ — изменение импульса тела.

Реактивное движение

Реактивное движение — это движение, которое происходит за счет 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.

Ракета представляет собой систему двух тел: оболочки (M — масса оболочки) и топлива (m — масса топлива), v — скорость выброса раскаленных газов, $\frac{m}{t}$ — расход реактивного топлива, u — скорость ракеты.

Второй закон Ньютона: $F_p t = mv$.

Реактивная сила: $F_p = \frac{mv}{t}$.

Мощность ракеты: $P = \frac{mv^2}{2t}$.

Закон сохранения импульса

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

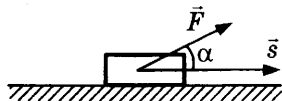
векторная сумма импульсов тел
после взаимодействия

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

Механическая работа

$$A = Fs \cos \alpha,$$

где F (Н) — модуль силы, s (м) — модуль перемещения, α — угол между направлением силы и перемещением.



Единица измерения работы — джоуль.

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

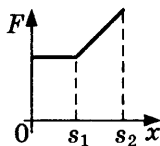
Условия совершения механической работы

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

Геометрический смысл механической работы.

Механическая работа численно равна площади фигуры под графиком в осях (F, x):

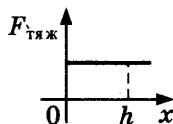
$$A = S_{\text{фиг}}.$$



Работа силы тяжести:

$$A = S_{\text{прям}},$$

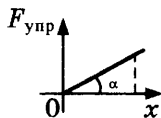
$$A = mgh.$$



Работа силы упругости:

$$A = S_{\text{треуг}},$$

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



Механическая энергия. Ее виды

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:

$$E = mgh.$$

Примеры потенциальной энергии в механике.

Тело поднято над землей: $E_p = mgh$,

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

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

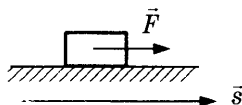
Обозначение: N (в механике) или P (в других разделах)

Основная формула	$N = \frac{A}{t}$
Единица измерения в СИ	$1 \text{ Вт} = 1 \text{ Дж} / 1 \text{ с}$
Дополнительная единица измерения энергии	$1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 1000 \text{ Вт} \cdot 3600 \text{ с} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}$
Мощность при равномерном прямолинейном движении	$N = \frac{A}{t} = \frac{F_T \cdot s}{t} = F_T v,$ где F_T — сила тяги, v — скорость тела
Средняя мощность	$N_{\text{ср}} = \frac{A}{t},$ где A — вся работа, t — все время
Средняя мощность силы тяги	$N_{\text{ср}} = F_T \cdot v_{\text{ср}}$
Мгновенная мощность	$N_{\text{мгн}} = F_T \cdot v_{\text{мгн}}$

Коэффициент полезного действия:

$$\eta = \frac{A_{\text{ползная}}}{A_{\text{полная}}} \cdot 100 \% \quad \text{или} \quad \eta = \frac{A_{\text{ползная}}}{E_{\text{затраченная}}} \cdot 100 \%$$

Работа и изменение кинетической энергии (теорема о кинетической энергии). Вывод формулы из определения механической работы:



$$A = Fs \cos \alpha; \quad \alpha = 0^\circ; \quad \cos \alpha = 1$$

$$F = ma; \quad s = \frac{v^2 - v_0^2}{2a}$$

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

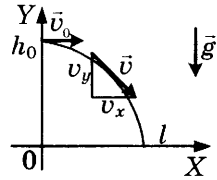
1. Свободное падение (движение по вертикали):

$$v_y = v_{0y} + g_y t .$$

2. Горизонтальный бросок:

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

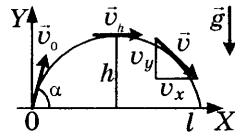
где $v_x = v_0$ и $v_y = -gt$.



3. Бросок под углом к горизонту:

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

где $v_x = v_0 \cos \alpha = v_h$ и $v_y = v_0 \sin \alpha - gt$.



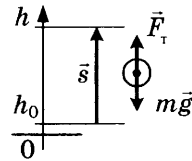
Работа и изменение потенциальной энергии тела поднятого над землей. Вывод формулы из определения механической работы:

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

$$\vec{F}_T \uparrow \vec{s}; \quad \cos \alpha = 1 ,$$

$$F_T = mg ; \quad s = h - h_0 ,$$

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



Работа и изменение потенциальной энергии упруго деформированного тела. Вывод формулы из определения механической работы:

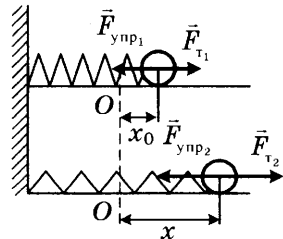
$$A = F s \cos \alpha$$

$$\vec{F}_T \uparrow \vec{s}; \quad \cos \alpha = 1$$

$$F_T = F_{\text{уп}} = \frac{kx_0 + kx}{2}$$

$$s = x - x_0$$

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



Закон сохранения механической энергии

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

$$E = E_h + E_p .$$

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

$$E_{ho} + E_{po} = E_k + E_p.$$

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

Закон сохранения механической энергии для движения в поле тяжести Земли:

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

Упругий удар (упругое столкновение движущегося тела с неподвижным телом).

Закон сохранения импульса:

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

Закон сохранения энергии:

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} = \frac{m_1 v_1'^2}{2} + \frac{m_2 v_2'^2}{2}.$$

Центральный удар. Если удар **центральный**, то направление векторов скоростей после взаимодействия лежат на той же прямой, что и до взаимодействия, поэтому закон сохранения импульса выполняется в проекциях на ось OX .

Закон сохранения импульса:

$$m_1 v_1 = m_1 v_1' + m_2 v_2'.$$

Закон сохранения энергии:

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} = \frac{m_1 v_1'^2}{2} + \frac{m_2 v_2'^2}{2}.$$

Решив систему уравнений, получаем формулы для расчета проекций скоростей тел на ось OX после столкновения:

$$v_1' = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} v_1;$$

$$v_2' = \frac{2m_1}{m_1 + m_2} v_1.$$

Анализ полученных формул. Направление движения налетающего шара после столкновения зависит от массы шаров. Если $m_1 > m_2$, то направление сохраняется; модуль скорости равен

$$v_1' = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} v_1.$$

Если $m_1 < m_2$, то направление меняется на противоположное; модуль скорости равен

$$v_1' = \frac{m_2 - m_1}{m_1 + m_2} v_1.$$

Если $m_1 = m_2$, то налетающее тело останавливается: $v_1' = 0$.

Изменение механической энергии. Нагревание тела в процессе движения и повышение температуры окружающей среды свидетельствуют о том, что часть механической энергии переходит во внутреннюю. Внутренняя энергия — это энергия молекул тела или окружающей среды. Она складывается из кинетической энергии движущихся молекул и потенциальной энергии их взаимодействия:

$$E - E_0 = A(F_{\text{тр.}}) < 0$$

или

$$E_o - E = Q, \quad E_{\text{кю}} + E_{\text{ро}} = E_{\text{к}} + E_{\text{р}} + Q,$$

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

где Q — модуль изменения внутренней энергии, работа по преодолению сил сопротивления воздуха, модуль работы силы трения.

Изменение механической энергии внешними силами. Неупругий удар:

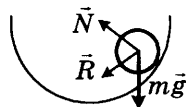
$$E - E_0 = A(F_{\text{внешн.}}) + A(F_{\text{тр.}}).$$

1.4. Статика

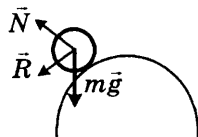
Статика изучает условия равновесия тел.

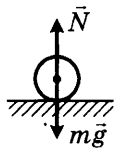
Виды равновесия

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



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



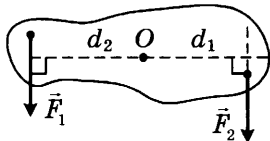


Безразличное равновесие. При выведении тела из состояния безразличного равновесия дополнительных сил не возникает.

Момент силы. Правило моментов

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.

Знаки моментов. Если сила вызывает вращение тела по часовой стрелке, то такой момент считают положительным:

$$M_1 = F_1 \cdot d_1.$$

Если сила вызывает вращение тела против часовой стрелки, то в этом случае момент отрицательный:

$$M_2 = -F_2 \cdot d_2.$$

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

$$\sum M_i = 0.$$

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

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

Условия равновесия. Тело не участвует в поступательном движении, если

$$\sum \vec{F}_i = 0; \vec{v}_0 = 0.$$

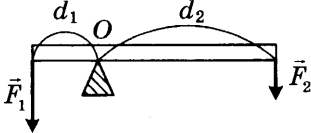
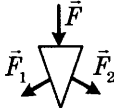
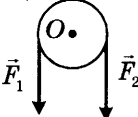
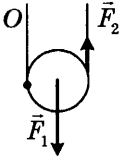
Тело не участвует во вращательном движении, если

$$\sum M_i = 0; \omega_0 = 0.$$

Тело находится в равновесии при выполнении сразу двух условий:

$$\sum \vec{F}_i = 0; \vec{v}_0 = 0, \sum M_i = 0; \omega_0 = 0.$$

Простые механизмы — приспособления, служащие для преобразования силы. К ним относятся ворот, наклонная плоскость, рычаг, клин и блоки.

<p>1. Рычаг Дает выигрыш в силе</p> $\frac{F_1}{F_2} = \frac{d_2}{d_1}$	
<p>2. Клин</p> $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$	
<p>3. Неподвижный блок изменяет направление силы</p> $d_1 = d_2; F_1 = F_2$	
<p>4. Подвижный блок дает выигрыш в силе в 2 раза</p> $d_1 = R; d_2 = 2R$	

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

Центр тяжести тела — точка, относительно которой момент сил тяжести всех точек тела равен нулю (в случае однородного поля силы тяжести и центр тяжести совпадает с центром масс).

1.5. Гидростатика

Давление. Сила давления

Давление твердого тела p (Па):

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

$$1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2.$$

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

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

Это связано с подвижностью молекул в жидком и газообразном состояниях.

Давление столба жидкости:

$$p = \rho_{\text{ж}}gh,$$

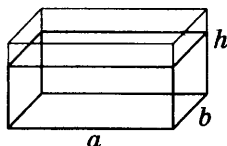
где h — высота столба жидкости (глубина).

Сила давления:

$$F = pS.$$

Сила давления на дно сосуда:

$$F_{\text{дно}} = \rho_{\text{ж}}ghab.$$

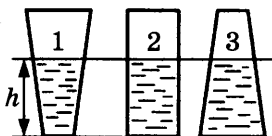


Сила давления на боковую грань аквариума:

$$F_{\text{бок.гр.}} = \frac{\rho_{\text{ж}}gh}{2}hb.$$

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

Поэтому в трех сосудах оно одинаково!



$$p_1 = p_2 = p_3,$$

а сила давления разная, так как она зависит от площади ($F = pS$):

$$F_1 < F_2 < F_3$$

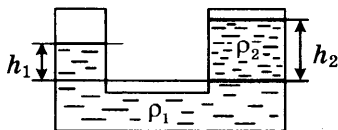
Сообщающиеся сосуды

Сообщающиеся сосуды — сосуды, соединенные между собой или имеющие общее дно.

Уровень жидкости в сообщающихся сосудах располагается горизонтально, если:

- поверхности жидкости открыты;
- в сосуды налита однородная жидкость;
- не один из сосудов не является капилляром;
- в жидкостях нет пузырьков с воздухом.

Давление столбов жидкости на одном горизонтальном уровне одинаково:



$$p_1 = p_2,$$

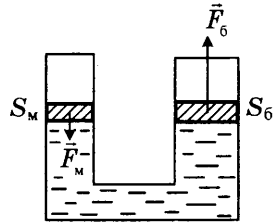
$$\rho_1 gh_1 = \rho_2 gh_2,$$

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

Гидравлический пресс — простой механизм, дающий выигрыш в силе. Он представляет собой сообщающиеся сосуды разного сечения.

В основе его действия лежит закон Паскаля:

$$p_m = p_6, \quad \frac{F_m}{S_m} = \frac{F_6}{S_6},$$



где F_m — сила, действующая на малый поршень (совершает полную работу); F_6 — сила, действующая на большой поршень (совершает полезную работу); S_m — площадь малого поршня; S_6 — площадь большого поршня.

Работа поршней (без потерь энергии):

$$A_m = A_6, \quad F_m h_m = F_6 h_6,$$

где h_m — вертикальное перемещение малого поршня; h_6 — перемещение большого поршня.

Выигрыш в силе:

$$\frac{F_6}{F_m} = \frac{S_6}{S_m} = \frac{h_m}{h_6}.$$

Равенство объемов жидкости при движении поршней:

$$S_m h_m = S_6 h_6.$$

КПД (есть потери энергии):

$$\eta = \frac{A_6}{A_m} \cdot 100\% = \frac{F_6 h_6}{F_m h_m} \cdot 100\% = \frac{P_6}{P_m} \cdot 100\%.$$

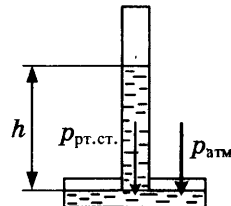
Атмосферное давление

Атмосфера — воздушная оболочка Земли. Она существует благодаря земному притяжению и беспорядочному движению молекул газа. В состав атмосферы входят азот, кислород и другие газы. Атмосфера не имеет четкой границы, плотность воздуха уменьшается с высотой.

Атмосферное давление — давление «воздушного океана», которое так же уменьшается с высотой.

Формула для определения атмосферного давления (в паскалях):

$$p_{\text{атм}} = \rho_{\text{рт}} g h,$$



где $p_{\text{атм}}$ (Па) — атмосферное давление; $\rho_{\text{рт}} = 13600 \text{ кг/м}^3$ — плотность ртути; $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ — ускорение свободного падения; h (м) — высота ртутного столба.

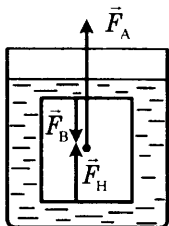
Единицы измерения давления:

$$1 \text{ мм рт. ст.} = 133 \text{ Па} ; 1 \text{ атм} = 10^5 \text{ Па} .$$

Нормальное атмосферное давление: $p_0 = 10^5 \text{ Па} .$

Архимедова сила

Архимедова сила (выталкивающая сила, подъемная сила) действует на погруженное в жидкость или газ тело.



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 всегда направлена *вертикально вверх*.

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

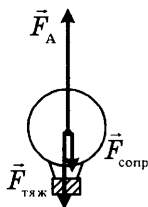
Архимедова сила равна разности веса тела в воздухе и веса тела в жидкости: $F_A = P_{\text{возд.}} - P_{\text{ж.}}$

Модуль выталкивающей силы определяется с помощью закона Архимеда.

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

Частные случаи определения архимедовой силы

	<p>Полное погружение</p> $F_A = \rho_{\text{ж.}} V_{\text{т.}} g ,$ <p>где $V_{\text{т.}}$ — объём тела</p>
	<p>Неполное погружение</p> $F_A = \rho_{\text{ж.}} V_{\text{п.ч.}} g ,$ <p>где $V_{\text{п.ч.}}$ — объём погруженной части тела</p>



Воздухоплавание. Подъемной силой служит архимедова сила:

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

а мешают движению сила тяжести и сила сопротивления воздуха:

$$F_{\text{тяж}} = (M_{\text{шара}} + m_{\text{газа}} + m_{\text{корб.}} + m_{\text{тр.}})g \text{ и } F_{\text{сопр.}} .$$

Управление шаром:

- шар заполняют нагретым воздухом или газом, плотность которого меньше плотности окружающего воздуха;

- сбрасывая балласт, можно увеличить высоту полета;
- охлаждая газ, можно вернуться на землю.

Условия плавания тел. На любое тело, погружённое в жидкость или газ, действуют две противоположно направленные силы: сила тяжести и архимедова сила. Направление движения тела зависит от того, какая из этих сил больше по модулю:

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

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

тело плавает внутри жидкости — $mg = F_A$; $\rho_t = \rho_{ж}$.

Если тело состоит из двух веществ, то

$$F_A = \rho_{ж} (V_1 + V_2)g,$$

$$F_{тяж} = (\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2)g.$$

Вес в гидростатике

Вес тела в воздухе:

- Если в условии задачи не указана плотность воздуха, то вес тела в воздухе:

$$P_0 = mg = \rho_t V_t g.$$

- Если в условии задачи указана плотность воздуха, то вес тела в воздухе:

$$P = P_0 - F_A, \quad P = mg - \rho_{возд} V_t g.$$

Вес тела в жидкости:

$$P_{ж} = P_0 - F_A,$$

$$P_{ж} = mg - F_A,$$

$$P_{ж} = \rho_t V_t g - \rho_{ж} V_{п.ч.} g.$$

Вес корабля:

$$P = F_A = \rho_{ж} V_{п.ч.} g.$$

Осадка корабля — глубина, на которую судно погружается в воду.

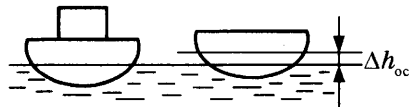
Ватерлиния — наибольшая допустимая осадка, отмеченная на корпусе судна.

- **Водоизмещение судна** — вес воды, вытесняемой судном при погружении до ватерлинии.

Вес груза, снятого с корабля:

$$P_{гр} = \Delta h_{ос} S \rho_{ж} g,$$

где $\Delta h_{ос}$ — изменение осадки корабля.



2. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА. ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ

Основные положения молекулярно-кинетической теории и их опытное обоснование.

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

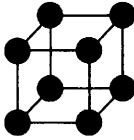
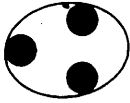
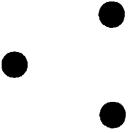
2. Между молекулами есть *промежутки*; при нагревании они увеличиваются, а при охлаждении уменьшаются. (Объем смеси воды и спирта меньше, чем сумма объемов воды и спирта до соединения.) Только у воды при охлаждении до $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже промежутки между молекулами увеличиваются.

3. Молекулы *движутся*. Чем быстрее их движение, тем больше температура вещества, и наоборот. (Диффузия — явление перемешивания 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.)

Строение твердых, жидких и газообразных веществ

Химический состав молекул не зависит от агрегатного состояния.

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

Свойства твердых, жидких и газообразных веществ

	Сохраняет объем	Сохраняет форму	Особые свойства
Твердое тело	+	+	
Жидкость	+	—	текучесть
Газ	—	—	летучесть

Идеальный газ. Основное уравнение МКТ идеального газа

Идеальный газ — газ, удовлетворяющий трем 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.

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

Давление идеального газа связано с тем, что молекулы газа беспорядочно движутся, сталкиваются друг с другом и со стенками сосуда:

$$p = \frac{1}{3} m_0 n \overline{v^2},$$

$$p = \frac{1}{3} \rho \overline{v^2},$$

$$p = \frac{2}{3} n \overline{E_k},$$

$$p = nkT.$$

Следствия из основного уравнения молекулярно-кинетической теории идеального газа:

скорость движения молекул или частиц:

$$v = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}},$$

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

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

$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{моль}}$ — постоянная Авогадро,

p (Па) — давление газа,

$m_0 = \frac{M}{N_A}$ (кг) — масса одной молекулы,

M (кг/моль) — молярная масса,

$n = \frac{N}{V} \left(\frac{1}{\text{м}^3} \right)$ — концентрация,

N — число молекул,

V (м³) — объём газа,

$\rho = \frac{m}{V}$ (кг/м³) — плотность вещества,

$$v = \sqrt{\frac{3RT}{M}};$$

температура — мера средней кинетической энергии молекул идеального газа:

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

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

m (кг) — масса газа,
 \bar{v}^2 (м²/с²) — среднее значение квадрата скорости,

$v = \sqrt{\bar{v}^2}$ (м/с) — квадратичная скорость,

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

$E = N\bar{E}_k$ (Дж) — полная энергия поступательного движения молекул,

T (К) — абсолютная температура газа.

Уравнение состояния идеального газа

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. Уравнение состояния также можно использовать, если газ переходит из одного состояния в другое и при этом изменяется его масса или молярная масса:

$$pV = \frac{m}{M}RT, \quad pV = \frac{N}{N_A}RT$$

$$pV = \nu RT, \quad p = \frac{\rho}{M}RT$$

$$p = \frac{n}{N_A}RT.$$

Объединенный газовый закон

Объединенный 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:*

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

Газовые законы устанавливают математическую зависимость параметров газа в изопроцессах. Формулы газовых законов можно получить как следствия объединенного газового закона.

Изотермический процесс	Изобарный процесс	Изохорный процесс
$m_1 = m_2$ $M_1 = M_2$ $T_1 = T_2$	$m_1 = m_2$ $M_1 = M_2$ $p_1 = p_2$	$m_1 = m_2$ $M_1 = M_2$ $V_1 = V_2$
Закон Бойля—Мариотта $p_1 V_1 = p_2 V_2$	Закон Гей-Люссака $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$	Закон Шарля $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$

Закон Дальтона

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.

Графики изопроцессов

Изотермический процесс (температура не меняется)		
Особый случай 		
Изобарный процесс (давление не меняется)		
	Особый случай 	
Изохорный процесс (объем не меняется)		
		Особый случай

Испарение и конденсация. Влажность воздуха

Испарение — переход молекул вещества из жидкого состояния в газообразное, причем процесс парообразования происходит только со свободной поверхности жидкости. Испарение бывает при любой температуре, так как всегда найдутся достаточно «быстрые» молекулы, способные преодолеть притяжение молекул жидкости. Запомните, что в результате испарения из жидкости вылетают самые быстрые молекулы, поэтому температура жидкости понижается.

Скорость испарения зависит от:

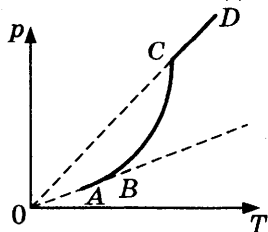
- 1) температуры жидкости (больше или меньше «быстрых» молекул);
- 2) рода жидкости (сильнее или слабее взаимодействие между молекулами);
- 3) наличия воздушных потоков;
- 4) влажности воздуха;
- 5) площади открытой поверхности.

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 не зависит от объема. Если объем уменьшается, то увеличивается «влажность», конденсация будет преобладать над испарением до тех пор, пока не наступит динамическое равновесие. Если объем увеличивается, то процесс испарения станет преобладающим, и через некоторое время снова наступит динамическое равновесие.

Зависимость давления насыщенного пара от температуры.



Для объяснения экспериментальной зависимости будем считать насыщенный пар идеальным газом и воспользуемся основным уравнением МКТ идеального газа:

$$p = nkT.$$

Прямая *AB*: давление возрастает только за счет увеличения скорости молекул газа.



На этапе *BC* две причины роста давления:

- 1) возрастают скорости молекул;
- 2) увеличивается их концентрация (из-за испарения).



Прямая *CD*: все молекулы находятся в газообразном состоянии, давление возрастает только за счет увеличения скоростей молекул.



Влажность воздуха. Относительная влажность φ (%):

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

где ρ (кг/м³) — 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).

Абсолютная влажность ρ (кг/м³) — это плотность водяного пара:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{pM_{\text{в.п.}}}{RT} = \frac{\varphi\rho_{\text{нас}}}{100\%},$$

где m (кг) — масса водяного пара; V (м³) — объём водяного пара; $M_{\text{в.п.}} = 18 \cdot 10^{-3}$ кг/моль — молярная масса водяного пара; $R = 8,31$ Дж/(К · моль) — универсальная газовая постоянная; T (К) — абсолютная температура пара.

3. ТЕРМОДИНАМИКА

Внутренняя энергия вещества

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

$$U = \sum E_{\text{к0}} + \sum E_{\text{р0}},$$

где $\sum E_{\text{к0}}(v)$ — 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;

$\sum E_{p0}(r)$ — 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 счет трения или ударов);
- 2) 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 твердых 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.

В вакууме теплопроводность невозможна.

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

В твердых телах и в вакууме конвекция невозможна.

Применение конвекции. Нагреватели следует располагать внизу, а охлаждающие тела вверху.

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

Свойства излучения. Темные 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: $Q = \pm \Delta U$.

Если внутренняя энергия вещества увеличивается, то $Q > 0$. Это происходит при нагревании, плавлении и кипении.

Если внутренняя энергия уменьшается, то $Q < 0$. Это происходит при охлаждении, отвердевании и конденсации.

Нагревание и охлаждение вещества: $Q = cm(t_k - t_n)$,

где $(t_k - t_n)$ (°C, К) — изменение температуры вещества; t_n (°C, К) — начальная температура вещества; t_k (°C, К) — конечная температура вещества; m (кг) — масса вещества; c (Дж/(кг · К)) — удельная теплоемкость вещества показывает, какое количество теплоты необходимо затратить, чтобы нагреть 1 кг данного вещества на 1 К (или на 1 °C).

Такое же количество теплоты выделится при охлаждении 1 кг этого вещества на 1 К: $Q = C\Delta T$,

где $C = cm$ (Дж/К) — теплоёмкость вещества,

$$Q = c_\mu \nu \Delta T,$$

где $c_\mu = \frac{Q}{\nu \Delta T}$ (Дж/(моль · К)) — молярная теплоёмкость.

Сгорание топлива: $Q = qm$,

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

$$Q = q_V V,$$

где q_V (Дж/м³) — теплота сгорания газа, показывающая, какое количество теплоты выделится при полном сгорании 1 м³ данного газа.

Агрегатные (фазовые) переходы

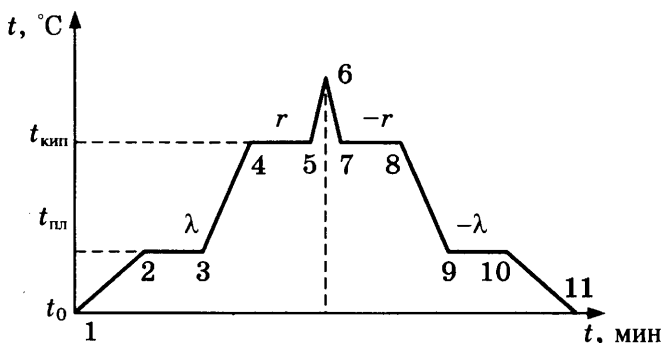
Плавление — переход вещества из твердого состояния в жидкое. Плавление каждого вещества происходит при определенной температуре, которую называют *температурой плавления*. Все подводимое тепло идет на разрушение кристаллической решетки, при этом увеличивается потенциальная энергия молекул. Кинетическая энергия остаётся без изменений и температура в процессе плавления не изменяется: $Q = \lambda m$, где λ (Дж/кг) — удельная теплота плавления, показывающая, какое количество теплоты необходимо сообщить 1 кг данного вещества, чтобы перевести его из твердого состояния в жидкое при условии, что оно уже нагрето до температуры плавления. В процессе отвердевания 1 кг данной жидкости, охлажденной до температуры отвердевания, выделится такое же количество теплоты.

Отвердевание (кристаллизация) — процесс, обратный плавлению. Осуществляется переход вещества из жидкого состояния в твердое. Происходит он при той же температуре, что и плавление. В процессе отвердевания температура также не изменяется: $Q = -\lambda m$.

Кипение (парообразование) — переход вещества из жидкого состояния в газообразное. Происходит при определенной температуре, которую называют *температурой кипения*. В отличие от испарения, при кипении процесс парообразования идет со всего объема 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: $Q = rm$, где r (Дж/кг) — удельная теплота парообразования, показывающая, какое количество теплоты необходимо затратить, чтобы перевести в пар 1 кг жидкости, нагретой до температуры кипения. Такое же количество теплоты выделится в процессе конденсации 1 кг пара, охлажденного до температуры конденсации.

Конденсация — процесс, обратный кипению. Происходит при температуре кипения, которая также не изменяется во время всего процесса: $Q = -rm$.

Тепловые процессы при нагревании и охлаждении



1-2	Нагревание твердого тела	$Q = c_т m(t_{пл} - t_0)$
2-3	Плавление ($t_{пл}$)	$Q = \lambda m$
3-4	Нагревание жидкости	$Q = c_ж m(t_{кип} - t_{пл})$
4-5	Кипение ($t_{кип}$)	$Q = rm$
5-6	Нагревание пара	$Q = c_п m(t - t_{кип})$
6-7	Охлаждение пара	$Q = c_п m(t_{кип} - t)$
7-8	Конденсация ($t_{кип}$)	$Q = -rm$
8-9	Охлаждение жидкости	$Q = c_ж m(t_{пл} - t_{кип})$
9-10	Отвердевание ($t_{пл}$)	$Q = -\lambda m$
10-11	Охлаждение твердого тела	$Q = c_т m(t_0 - t_{пл})$

Теплообмен. Уравнение теплового баланса с учетом знаков количества теплоты:

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

$$Q_{\text{отд}} < 0,$$

$$Q_{\text{получ.}} > 0.$$

Коэффициент полезного действия:

$$\eta = \frac{E_{\text{полезн.}}}{W_{\text{затрач}}} \cdot 100\%; \quad \eta = \frac{A_{\text{полезн.}}}{A_{\text{затрач}}} \cdot 100\%, \quad \text{или} \quad \eta = \frac{N_{\text{полезн.}}}{P_{\text{потреб.}}} \cdot 100\%.$$

Работа идеального газа

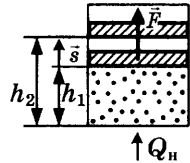
Если газ, находящийся под поршнем, нагреть, то, расширяясь, он поднимет поршень, т.е. совершит механическую работу.

Изобарное расширение газа:

$$A = F s \cos \alpha; \quad F = pS;$$

$$s = h_2 - h_1; \quad \cos \alpha = 1, \quad \vec{F} \uparrow \uparrow \vec{s};$$

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



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

Изобарное нагревание газа:

$$1) A' = \nu R \Delta T;$$

$$2) A' = \nu R(T_2 - T_1);$$

$$3) A' = \frac{m}{M} R \Delta T.$$

Газ находится под массивным поршнем и медленно расширяется:

$$A' = \left(p_{\text{атм}} + \frac{mg}{S} \right) \Delta V.$$

Изохорный процесс: $\Delta V = 0, \quad A' = 0.$

Геометрический смысл работы в термодинамике. В термодинамике для нахождения работы можно вычислить площадь фигуры под графиком в осях (p, V) .

Внутренняя энергия идеального газа

Внутренняя энергия идеального газа представляет собой сумму только кинетической энергии всех молекул, а потенциальной энергией взаимодействия можно пренебречь:

$$U = \sum E_{k_0} = N E_{k_0} = \frac{m N_A}{M} \cdot \frac{ikT}{2} = \frac{i}{2} \cdot \frac{m}{M} RT = \frac{i}{2} \nu RT = \frac{i}{2} pV,$$

где i – степень свободы: $i = 3$ для одноатомного (или идеально-го) газа, $i = 5$ для двухатомного газа, $i = 6$ для трехатомного газа и больше.

Числом степеней свободы механической системы называют количество независимых величин, с помощью которых может быть задано положение системы.

Изменение внутренней энергии идеального газа

Основная формула	$\Delta U = \frac{i}{2} \cdot \frac{m}{M} R \Delta T = \frac{i}{2} \nu R \Delta T = \frac{i}{2} \nu R (T_2 - T_1)$
Изобарное рас- ширение	$\Delta U = \frac{i}{2} \nu R (T_2 - T_1) = \frac{i}{2} (pV_2 - pV_1) = \frac{i}{2} p \Delta V$
Изохорное увели- чение давления	$\Delta U = \frac{i}{2} \nu R (T_2 - T_1) = \frac{i}{2} (p_2 V - p_1 V) = \frac{i}{2} V \Delta p$
Произвольный процесс	$\Delta U = \frac{3}{2} \nu R (T_2 - T_1) = \frac{3}{2} (p_2 V_2 - p_1 V_1)$

Первое начало термодинамики

Первое начало термодинамики (закон сохранения энергии в тепловых процессах): *внутреннюю энергию можно изменить двумя способами — за счет теплопередачи или при соверше-нии работы*

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

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

$-\Delta U$ — внутренняя энергия уменьшается,

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

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

$+A'$ — газ сжимает внешняя сила,

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

Знак перед работой показывает, как процесс совершения ра-боты влияет на изменение внутренней энергии газа.

От чего зависят физические величины, входящие в первое начало термодинамики.

Изменение внутренней энергии — от изменения температуры:

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

Количество теплоты — от изменения температуры: $Q = c m \Delta T$.

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

Первое начало термодинамики для изопроцессов:

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)	$Q = 0, \Delta U = A'$

Тепловые машины

Тепловые машины — устройства, в которых за счет внутренней энергии топлива совершается механическая работа. Чтобы тепловая машина работала циклически, необходимо, чтобы часть энергии, полученной от нагревателя, она отдавала холодильнику.

Второе начало термодинамики: *в циклически действующем тепловом двигателе невозможно преобразовать все количество теплоты, полученное от нагревателя, в механическую работу.*

Цикл Карно происходит с идеальным газом.

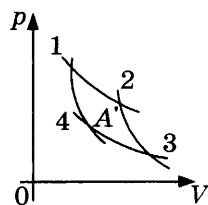
График цикла Карно состоит из двух адиабат и двух изотерм:

1-2 — изотермическое расширение

2-3 — адиабатное расширение

3-4 — изотермическое сжатие

4-1 — адиабатное сжатие



Максимальный КПД соответствует циклу Карно:

$$\eta = \frac{Q_n - Q_x}{Q_n} \cdot 100\%,$$

$$\eta = \frac{A'}{Q_n} \cdot 100\%, \quad \eta = \frac{Nt}{Q_n} \cdot 100\%, \quad \eta = \frac{A'}{A' + Q_x} \cdot 100\%$$

$$\eta = \frac{T_n - T_x}{T_n} \cdot 100\%,$$

где Q_n (Дж) — количество теплоты, полученное от нагревателя (полученное количество теплоты);

Q_x (Дж) — количество теплоты, отданное холодильнику (отданное количество теплоты);

A' (Дж) — работа, совершенная газом;

N (Вт) — полезная мощность;

T_n (К) — температура нагревателя;

T_x (К) — температура холодильника.

4. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

4.1. Электростатика

Электрический заряд. Закон сохранения заряда.

Электрическое поле

Электростатика изучает неподвижные заряды.

Электризация — процесс, в результате которого тело приобретает электрический заряд. Если тело начинает притягивать к себе другие тела, то говорят, что оно наэлектризовано, или приобрело электрический заряд.

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

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

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

Систему называют *замкнутой*, если в ней не происходит обмена зарядами с окружающей средой.

Экспериментально доказано, что заряды можно делить, но до определенного предела. Носитель наименьшего электрического заряда — отрицательно заряженный *электрон*:

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

Модуль любого заряда кратен заряду электрона:

$$q = Nq_e,$$

где $N = \frac{q}{q_e}$ — избыток электронов.

Удельный заряд: $\frac{q}{m}$ (Кл/кг).

Поверхностная плотность заряда: $\sigma = \frac{q}{S}$ (Кл/м²).

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 $c = 3 \cdot 10^8$ м/с.

Закон Кулона

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:*

$$F_{\text{к}} = \frac{k|q_1| \cdot |q_2|}{r^2},$$

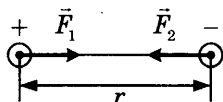
где $|q_1|$ (Кл) и $|q_2|$ (Кл) — модули зарядов, r (м) — расстояние между зарядами, k — коэффициент пропорциональности, который численно равен силе взаимодействия между двумя точечными зарядами по 1 Кл, находящимися на расстоянии 1 м друг от друга:

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

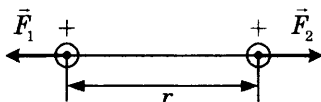
$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Кл²/(Н·м²) — электрическая постоянная.

Направление силы Кулона зависит от знаков зарядов.

Взаимное притяжение
разноименных зарядов:



Взаимное отталкивание
одноименных зарядов:



Закон Кулона в среде:

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

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

Характеристики электрического поля

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

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_{\text{к}}}{q_0},$$

где q_0 — пробный заряд.

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

Силовые линии — линии, касательные к которым совпадают с вектором напряженности.

- Направление силовой линии совпадает с направлением вектора напряженности.
- Чем гуще силовые линии, тем сильнее электрическое поле.
- Линии напряженности 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:

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

Знак потенциальной энергии зависит от знаков заряженных тел.

$W_{12} < 0$ — энергия притяжения разноименно заряженных тел; $W_{12} > 0$ — энергия отталкивания одноименно заряженных тел.

Потенциал ϕ (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 отсчета потенциальной энергии, а разность потенциалов (напряжение U (В)) — от выбора нулевого уровня не зависит:

$$U = \phi_1 - \phi_2 = \frac{A_{12}}{q},$$

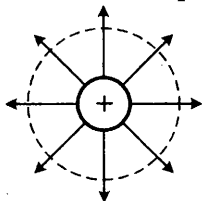
где A_{12} — работа электрических сил по перемещению заряда из точки 1 в точку 2.

Эквипотенциальные поверхности — это поверхности, имеющие одинаковый потенциал. Они равноудалены от заряженных

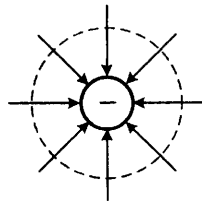
тел и обычно повторяют их форму. Эквипотенциальные поверхности перпендикулярны силовым линиям.

Электростатическое поле точечного заряда

Положительный заряд $+Q$



Отрицательный заряд $-Q$



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

Модуль напряженности:

- 1) не зависит от значения пробного заряда q_0

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

где r — расстояние от точечного заряда до изучаемой точки;

- 2) в вакууме $E = \frac{kQ}{r^2}$;

- 3) в среде $E_{\text{ср.}} = \frac{E_{\text{вак}}}{\epsilon} = \frac{kQ}{\epsilon r^2}$.

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

Знак потенциала зависит от знака заряда, создающего поле.

Эквипотенциальные поверхности — концентрические сферы, центр которых совпадает с положением заряда.

Работа электрического поля по перемещению точечного заряда:

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

Принцип суперпозиции сил и полей

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

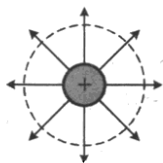
$$\vec{R} = \Sigma \vec{F}_i, \text{ где } F_i = \frac{kq_1q_2}{r_i^2}.$$

Принцип суперпозиции полей: если в некоторой точке пространства накладываются электрические поля от нескольких зарядов, то результирующая напряженность находится как векторная сумма напряженностей отдельных полей.

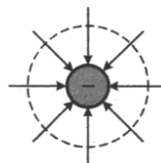
$$\vec{E} = \Sigma \vec{E}_i, \text{ где } E_i = \frac{kq_i}{r_i^2}.$$

Электростатическое поле заряженной сферы

Положительно заряженная
сфера $+Q$



Отрицательно заряженная
сфера $-Q$



Силовые линии — радиальные линии, начинающиеся на положительно заряженной сфере или радиальные линии, заканчивающиеся на отрицательно заряженной сфере.

Модуль напряженности:

1) внутри проводника ($r < R$) $E = 0$;

2) на поверхности проводника ($r = R$) $E = \frac{kQ}{R^2}$,

где R — радиус сферы;

3) вне проводника ($r > R$) $E = \frac{kQ}{r^2} = \frac{kQ}{(R+a)^2}$,

где a — расстояние от поверхности сферы до изучаемой точки;
 r — расстояние от центра сферы до изучаемой точки.

Сила Кулона $\vec{F} = q\vec{E}$.

Потенциал:

1) внутри проводника ($r < R$) и на поверхности проводника

$$(r = R) \varphi = \pm \frac{kQ}{R};$$

2) вне проводника ($r > R$) $\varphi = \pm \frac{kQ}{r} = \pm \frac{kQ}{R+a}$.

Эквипотенциальные поверхности — объём сферы представляет собой эквипотенциальную область, а её поверхность является эквипотенциальной. Вне проводника эквипотенциальные поверхности представляют собой концентрические сферы.

$$\text{Ёмкость: } C = \frac{Q}{\varphi} = \frac{QR}{kQ} = \frac{\epsilon R}{k}.$$

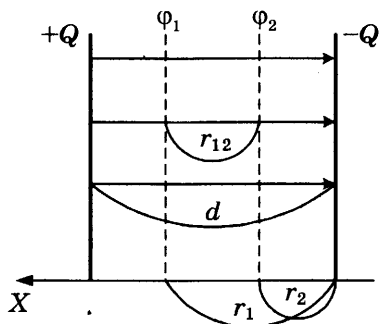
$$\text{Потенциальная энергия: } W = \frac{C\varphi^2}{2} = \frac{\epsilon R\varphi^2}{2k}.$$

Работа электрического поля по перемещению точечного заряда:

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

Однородное электростатическое поле

Электрическое поле сосредоточено между разноименно заряженными пластинами (обкладками конденсатора).



Силовые линии начинаются на положительно заряженной пластине, а заканчиваются на отрицательно заряженной. Силовые линии параллельны друг другу, т. е. поле однородно.

$$\text{Напряженность: } E = \frac{Q}{S\epsilon_0\epsilon} = \frac{\sigma}{\epsilon_0\epsilon},$$

где $\sigma = \frac{Q}{S}$ — поверхностная плотность заряда.

$$\text{Потенциал: } \varphi = Er.$$

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

$$\text{Напряжение между пластинами: } U = Ed.$$

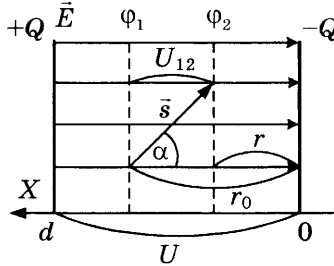
Эквипотенциальные поверхности — плоскости, параллельные заряженным пластинам.

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

Работа однородного электрического поля

Механическая работа: $A = F s \cos \alpha$,

где $F_k = qE = q \frac{U}{d}$ — сила Кулона; $s \cos \alpha = r_0 - r$ — проекция перемещения на силовую линию.



Основные формулы для расчета работы:

$$A = F_k s \cos \alpha = \pm q E s \cos \alpha,$$

$$A = \pm q E (r_0 - r) = q E r_0 - q E r,$$

$$A = \pm q \frac{U}{d} s \cos \alpha = \pm q \frac{U}{d} (r_0 - r),$$

где E — напряженность электрического поля, U — разность потенциалов (напряжение) между пластинами, d — расстояние между пластинами, $\pm q$ — заряд, переносимый полем, s — модуль перемещения заряда, α — угол между силой Кулона и перемещением, r_0 — начальное положение заряда, r — конечное положение заряда.

Работа и разность потенциалов:

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

где φ_1 — начальный потенциал, φ_2 — конечный потенциал, U_{12} — напряжение между точками начального и конечного положения заряда.

Работа и изменение кинетической энергии:

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

Работа и изменение потенциальной энергии:

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

Конденсаторы

Конденсатор — это два проводника, разделенных слоем диэлектрика, который служит для накопления заряда.

Плоский конденсатор — система двух разноименно заряженных пластин.

Разность потенциалов U (В) между обкладками конденсатора (напряжение между пластинами):

$$U = Ed,$$

где E (В/м) — напряженность однородного электрического поля, d (м) — расстояние между пластинами конденсатора.

Электроёмкость конденсатора. Электроёмкость плоского конденсатора C (Ф):

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

где $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Кл²/(Н·м²); ϵ — диэлектрическая проницаемость среды, S (м²) — площадь каждой пластины.

У воздушного конденсатора $\epsilon = 1$.

Электроёмкость конденсатора:

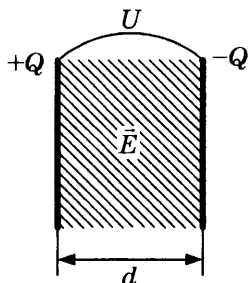
$$C = \frac{Q}{U} \text{ или } C = \frac{q}{U}.$$

Электроёмкость конденсатора зависит только от геометрических параметров S, d, ϵ и не зависит от заряда Q (q) и напряжения U .

Энергия конденсатора:

$$W_1 = \frac{q^2}{2C} = \frac{CU^2}{2} = \frac{\epsilon \epsilon_0 S d E^2}{2}.$$

Плотность энергии:
$$\frac{W_2}{V} = \frac{W_1}{Sd} = \frac{\epsilon \epsilon_0 E^2}{2}.$$



Соединения конденсаторов

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

4.2. Постоянный ток

Электрический ток в металлах

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






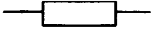


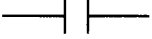
Условия существования электрического тока:

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

Носители электрического тока:

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

Графическое изображение некоторых элементов электрической цепи:

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

По проводам перемещаются отрицательные электроны, т.е. ток идет от «-» к «+» источника. Направление движения электронов называют действительным.

Условное направление тока: от «+» источника к «-».

Действия электрического тока: тепловое, световое, магнитное, химическое, механическое, биологическое.

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

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

где N — число электронов.

Плотность тока j (А/м²): $j = \frac{I}{S}$.

Закон Ома для участка цепи: $I = \frac{U}{R}$.

Сила тока и скорость движения электронов: $I = nq_e S v$,
 где n — концентрация.

$$n = \frac{N}{V} = \frac{\rho}{m_0} = \frac{\rho N_A}{M}.$$

Скорость движения электронов: $v = \frac{I}{nq_e S}$.

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

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

где ρ (Ом · м) — *удельное сопротивление*, показывающее, какое сопротивление имеет проводник длиной 1 м площадью поперечного сечения 1 м², изготовленный из определенного материала; l (м) — длина проводника; S (м²) — площадь сечения.

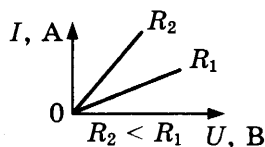
Зависимость сопротивления проводника от температуры:

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

где R_0 — сопротивление при 0 °С; $\alpha \left(\frac{1}{\text{К}} = \frac{1}{\text{°C}} \right)$ — температурный коэффициент (табличная величина).

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

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



Вольт-амперная характеристика — это зависимость силы тока от напряжения.

Соединения проводников:

	Последовательное соединение	Параллельное соединение
Схема		
Полная сила тока	$I = I_1 = I_2$	$I = I_1 + I_2$
Полное напряжение	$U = U_1 + U_2$	$U = U_1 = U_2$

	Последовательное соединение	Параллельное соединение
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	$R = nR_0$	$R = \frac{R_0}{n}$
Примеры	Елочная гирлянда	Многожильный провод

Полная цепь

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 по перемещению зарядов внутри источника:

$$\mathcal{E} = \frac{A_{ст}}{q}.$$

Сторонние силы переносят положительные заряды внутри источника от «-» к «+».

Закон Ома для полной цепи:

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

где R — полное сопротивление внешней цепи, r — внутреннее сопротивление источника.

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

$$I_{к.з.} = \frac{\mathcal{E}}{r}.$$

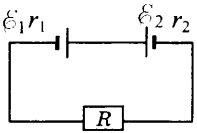
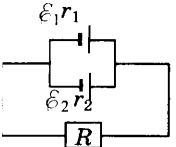
Напряжение на внешней цепи (напряжение на клеммах источника, падение напряжения на внешней цепи):

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

КПД источника тока:

$$\eta = \frac{U}{\mathcal{E}} \cdot 100\% = \frac{R}{R + r} \cdot 100\%.$$

Соединения источников:

	Последовательное соединение	Параллельное соединение
Схема		
Эквивалентное внутреннее сопротивление	$r_3 = r_1 + r_2$	$\frac{1}{r_3} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}$
Эквивалентное ЭДС	$\mathcal{E}_3 = \pm \mathcal{E}_1 \pm \mathcal{E}_2$	$\frac{\mathcal{E}_3}{r_3} = \pm \frac{\mathcal{E}_1}{r_1} \pm \frac{\mathcal{E}_2}{r_2}$
Закон Ома для полной цепи	$I = \frac{\mathcal{E}_3}{r_3 + R}$	
Закон Ома для n одинаковых источников	$I = \frac{n\mathcal{E}}{R + nr}$	$I = \frac{\mathcal{E}}{R + \frac{r}{n}}$

Направление тока и знаки ЭДС:

 Если  , то $+\mathcal{E}$	 Если  , то $-\mathcal{E}$
---	---

Работа и мощность электрического тока

Работа и энергия электрического тока:

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

Закон Джоуля—Ленца: $Q = I^2Rt$.

Мощность P (Вт) — это работа, производимая за 1 с: $P = \frac{A}{t}$.

Мощность тока (мощность на внешней цепи, мощность на нагрузке, полезная мощность, тепловая мощность):

$$P = \frac{qU}{t} = IU = I^2R = \frac{U^2}{R} = \left(\frac{\mathcal{E}}{R+r} \right)^2 R.$$

Мощность на внешней цепи будет максимальная, если $R = r$:

$$P_{\max} = \left(\frac{\mathcal{E}}{r+r} \right)^2 r = \frac{\mathcal{E}^2}{4r}.$$

Мощность внутренней цепи:

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

Полная мощность:

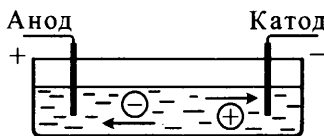
$$P_{\text{полн}} = I^2 (R + r) = \frac{\mathcal{E}^2}{R + r}.$$

Электрический ток в жидкостях, полупроводниках, в вакууме, в газах

Законы электролиза.

Электролиты — жидкости, проводящие электрический ток.

К ним относят растворы солей, щелочей и кислот.



Носители заряда: положительные и отрицательные ионы.

Электролиз — процесс выделения чистых веществ на электродах, который происходит за счет окислительно-восстановительных реакций.

Законы Фарадея позволяют определить массу выделившегося вещества:

$$1) m = kq = kIt,$$

$$2) m = \frac{A_r \cdot 10^{-3}}{N_A n q_e} It.$$

Электрохимический эквивалент k (кг/Кл):

$$k = \frac{m_0}{q_0} = \frac{A_r \cdot 10^{-3}}{N_A} \cdot \frac{1}{n q_e},$$

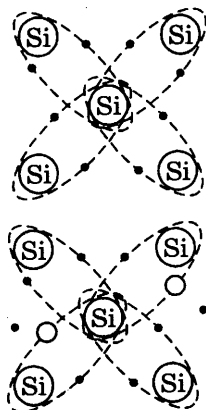
где m_0 (кг) — масса иона; $q_0 = n q_e$ (Кл) — заряд иона; n — валентность иона в данном соединении.

Экспериментальное открытие законов Фарадея позволило определить заряд электрона:

$$q_e = \frac{A_r \cdot 10^{-3}}{m N_A n} It.$$

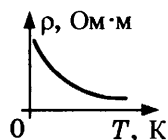
Электрический ток в полупроводниках. К полупроводникам относят элементы четвертой группы Периодической системы Д.И. Менделеева, которые имеют четыре валентных электрона.

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



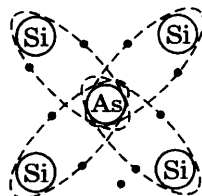
При повышении температуры или облучении полупроводников часть ковалентных связей разрушается, и появляются свободные электроны. На месте разрушенной связи возникает электронная вакансия — дырка. Она также перемещается по кристаллу, но ведет себя подобно положительной частице.

Зависимость удельного сопротивления полупроводников от температуры и внешнего излучения.

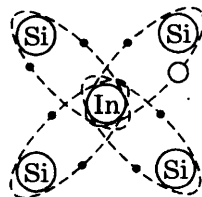


Примесная проводимость полупроводников.

Донорные примеси — элементы 5-й группы таблицы химических элементов Д.И. Менделеева. Только 4 из 5 валентных электронов 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 четвертой появляется дырка. Полупроводник с положительными носителями относится к полупроводникам *p-типа*.



Применение полупроводниковых приборов.

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

Фоторезисторы чувствительны к изменению освещенности.

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 молекул могут отделяться электроны, а молекулы превращаются в положительные ионы.

Самостоятельный разряд. В газах при столкновении молекул может освободиться хоть один электрон. Если он попадет в электрическое поле, то начнет двигаться с ускорением. Сталкиваясь с нейтральной молекулой газа, ускоренный электрон может «выбить» из нее другой электрон, превратив саму молекулу в положительный ион. Электроны будут и дальше ускоряться, разрушая молекулы. Ионы создают ток в противоположном направлении. Таким образом, электрический ток в газах создается электронами и положительными ионами.

4.3. Магнитное поле. Электромагнитная индукция

Вектор магнитной индукции. Линии магнитной индукции

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:

$$B = \frac{F_{A\max}}{I\ell}.$$

Вектор напряженности магнитного поля \vec{H} (А/м):

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu\mu_0},$$

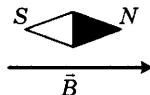
где μ — магнитная проницаемость среды (если в тексте задачи среда не указана, то $\mu = 1$); $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная

постоянная. Направление напряженности \vec{H} совпадает с направлением вектора магнитной индукции, т.е. $\vec{H} \uparrow \vec{B}$.

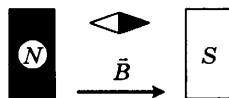
Способы определения направления вектора магнитной индукции (или напряженности).

1. С помощью постоянных магнитов:

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

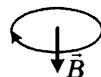


- 2) в пространстве между полюсами постоянного магнита вектор магнитной индукции \vec{B} выходит из северного полюса.



2. При определении направления вектора магнитной индукции с помощью витка с током следует применять правило буравчика:

- 1) если по витку ток идет против часовой стрелки, то вектор магнитной индукции \vec{B} направлен вверх;
- 2) если ток идет по часовой стрелке, то вектор магнитной индукции \vec{B} направлен вниз.



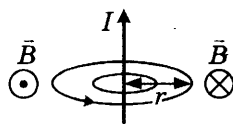
Обозначение направлений векторов:

Вверх ↑	Вниз ↓	Вправо →
Влево ←	На нас ⊥ плоскости чертежа 	От нас ⊥ 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 создано прямолинейным током:

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



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



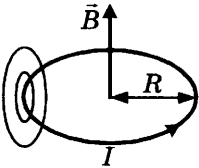
Вектор магнитной индукции на расстоянии r от оси проводника:

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

а напряженность:

$$H = \frac{I}{2\pi r}.$$

Магнитное поле создано круговым током:



1. Линии представляют собой окружности, опоясывающие круговой ток.

2. Вектор магнитной индукции в центре витка направлен вверх, если ток идет против часовой стрелки, и вниз, если по часовой стрелке.

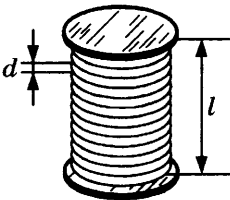
Вектор магнитной индукции в центре витка, радиус которого R :

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

а напряженность в центре витка:

$$H = \frac{I}{2R}.$$

Магнитное поле создано соленоидом (электромагнитом):



1. Линии магнитной индукции являются замкнутыми, причем 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 идет против часовой стрелки, то вектор магнитной индукции \vec{B} внутри соленоида направлен вверх; если по часовой стрелке, то вниз.

Вектор магнитной индукции в центральной области соленоида:

$$B = \frac{\mu\mu_0 IN}{l} = \frac{\mu\mu_0 I}{d},$$

а напряженность:

$$H = \frac{IN}{l} = \frac{I}{d}.$$

Принцип суперпозиции полей

Если в некоторой точке пространства накладываются магнитные поля, то результирующий вектор магнитной индукции находят как геометрическую сумму векторов магнитной индукции, составляющих магнитное поле:

$$\vec{B} = \sum \vec{B}_i .$$

Сила Ампера

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

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

где α — угол между условным направлением тока и вектором магнитной индукции.

Направление силы Ампера определяется по *правилу левой руки*:

- 1) четыре пальца располагают по *условному* направлению тока;
- 2) вектор магнитной индукции входит в ладонь;
- 3) большой палец укажет направление силы Ампера.

Сила Ампера между двумя параллельными проводниками с токами:

$$F_1 = F_2 = I_1 B l \sin 90^\circ = \frac{\mu \mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi d} ,$$

где d — расстояние между проводниками, l — длина проводников.

Если токи направлены в одну сторону, то проводники *притягиваются*, а если в противоположные, то *отталкиваются*.

Максимальный момент силы Ампера: $M_{\max} = BIab = BIS$,

где a, b — длины сторон вращающейся рамки.

Если N витков, то

$$M_{\max} = NBIS .$$

Сила Лоренца

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

Силы Лоренца и Ампера создаются магнитным полем, но сила Лоренца действует на одну частицу, а сила Ампера на электрический ток, т. е. поток заряженных частиц:

$$F_{\text{л}} = \frac{F_A}{N} = \frac{BIl \sin \alpha}{nV} = \frac{BqnvSl \sin \alpha}{nLS} .$$

Модуль силы Лоренца: $F_{\text{л}} = qvB \sin \alpha$.

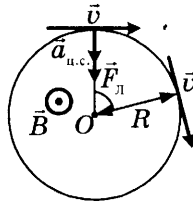
Направление силы Лоренца определяется по *правилу левой руки*:

- 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.

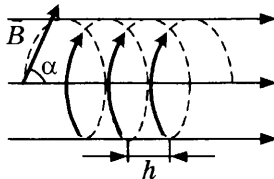
Заряженная частица в магнитном поле. В магнитном поле на частицу действует сила Лоренца. Характер движения зависит от направления скорости частицы и вектора магнитной индукции.

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.



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



Радиус спирали:
$$R = \frac{mv \sin \alpha}{qB}$$

Шаг спирали:
$$h = \frac{2\pi m v \cos \alpha}{qB}$$

Сравнение электрического и магнитного полей:

Электростатическое поле	Вихревое электрическое поле	Магнитное поле
Определение		
Среда, через которую передается электрическое взаимодействие	Среда, через которую передается электрическое взаимодействие	Среда, через которую передается магнитное взаимодействие
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
Общие свойства: поля материальны, непрерывно распределены в пространстве		
Силовая характеристика		
Напряженность электрического поля \vec{E}	Напряженность электрического поля \vec{E}	Вектор магнитной индукции \vec{B}
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.

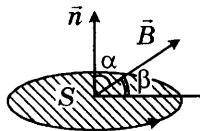
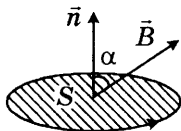
Заряженная частица в электрическом и магнитном полях:

	Электрическое поле	Магнитное поле
Сила	Электрическая сила (сила Кулона): $F_K = qE = \frac{qU}{d}$	Магнитная сила (сила Лоренца): $F_L = qvB \sin \alpha$
Ускорение и его на- правление	Тангенциальное ускорение: $a_E = \frac{qE}{m}, \quad \vec{a}_E \uparrow \uparrow \vec{E}$	Нормальное ускорение: $a_B = \frac{qvB}{m}, \quad \vec{a}_B \uparrow \uparrow \vec{F}_L$
Полное ускорение	$a = \sqrt{a_E^2 + a_B^2}$	

Магнитный поток

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

где Φ (Вб) — магнитный поток, \vec{B} — вектор магнитной индукции, S — площадь, ограниченная контуром, α — угол между \vec{B} и положительной нормалью к контуру \vec{n} . Направление положительной нормали определяется *правилом буравчика*.



Магнитный поток вращающейся рамки:

$$\Phi = BS \cos(\omega t),$$

где ω — угловая скорость вращения рамки.

Магнитный поток вращающейся рамки (N витков):

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

Магнитный поток Φ и индуктивность L проводника:

$$\Phi = LI,$$

$$N\Phi = LI.$$

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

Индуктивность — коэффициент пропорциональности между магнитными потоками Φ и силой тока I .

Индуктивность — мера инертности электрической цепи.

Правило Ленца

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.

Закон электромагнитной индукции

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

Для одного витка

$$\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{\Phi_0 - \Phi}{\Delta t}$$

$$\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta B}{\Delta t} S \cos \alpha = \frac{B_0 - B}{\Delta t} S \cos \alpha$$

$$\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta S}{\Delta t} B \cos \alpha = \frac{S_0 - S}{\Delta t} B \cos \alpha$$

$$\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta \cos \alpha}{\Delta t} BS = \frac{\cos \alpha_0 - \cos \alpha}{\Delta t} BS$$

Для N витков

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

$$\mathcal{E}_i = -N \frac{\Delta B}{\Delta t} S \cos \alpha$$

$$\mathcal{E}_i = -N \frac{\Delta S}{\Delta t} B \cos \alpha$$

$$\mathcal{E}_i = -N \frac{\Delta \cos \alpha}{\Delta t} BS$$

ЭДС индукции равна первой производной от магнитного потока по времени, взятой со знаком минус:

$$\mathcal{E}_i = -\dot{\Phi}(t), \quad \mathcal{E}_i = BS\omega \sin(\omega t)$$

$$\mathcal{E}_i = NBS\omega \sin(\omega t)$$

ЭДС индукции в движущихся проводниках:

$$\mathcal{E}_i = Bv \sin \alpha.$$

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

$$N\Phi = LI, \quad N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

Самоиндукция

При изменении силы тока в катушке происходит изменение магнитного потока, создаваемого этим током. Изменение магнитного потока, пронизывающего катушку, должно вызывать появление ЭДС индукции в катушке.

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:

$$\varepsilon_{is} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

Энергия магнитного поля:

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

5. КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

Свободные колебания

Основные характеристики колебаний:

<p>Механические колебания — это процессы в механических системах, в которых периодически изменяются координата, скорость, ускорение и сила</p>	<p>Электромагнитные колебания — процессы в электрических цепях, в которых периодически изменяются заряд, сила тока, напряжение и ЭДС</p>
<p>Свободные колебания</p>	
<p>Свободные механические колебания возможны в системе, находящейся в состоянии устойчивого равновесия и если трение в системе мало.</p> <p>1. Для начала свободных колебаний достаточно вывести систему из положения равновесия, т.е. сообщить ей дополнительную механическую энергию.</p> <p>2. Свободные механические колебания из-за трения являются затухающими</p>	<p>В электрических цепях возможны свободные колебания, если сопротивление пренежимо мало (например, при сверхпроводимости).</p> <p>1. Для начала свободных электромагнитных колебаний достаточно сообщить заряд конденсатору, т.е. передать колебательной системе электрическую энергию.</p> <p>2. Свободные электромагнитные колебания затухают из-за сопротивления</p>

Период T (с) — время одного полного колебания:

$$T = \frac{t}{N} = \frac{1}{\nu} = \frac{2\pi}{\omega}.$$

Частота ν (Гц) — число колебаний за 1 с:

$$\nu = \frac{N}{t} = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}.$$

Циклическая (круговая, собственная) частота ω (рад/с) — число колебаний за 2π секунд:

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

Амплитуда — модуль наибольшего значения изменяющейся величины.

Гармонические колебания — это колебания, происходящие по закону синуса и косинуса.

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, φ_0 — начальная фаза колебаний, ω — циклическая частота.

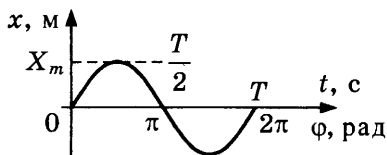
Закон гармонических электромагнитных колебаний:

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

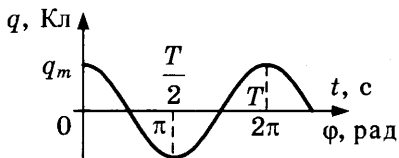
где q — мгновенное значение заряда на конденсаторе, q_m — амплитуда заряда, $\varphi = \omega t + \varphi_0$ — фаза колебаний, φ_0 — начальная фаза колебаний, ω — циклическая частота

График колебательного процесса ($\varphi_0 = 0$):

Синусоида



Косинусоида



Математический маятник.

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

Маятник считают математическим, если он удовлетворяет трем условиям:

- 1) размеры нити значительно превышают размеры груза,
- 2) нить нерастяжима и невесома, т.е. вся масса маятника сосредоточена в массе груза,
- 3) отклонения нити малы (длина дуги \approx длине хорды).

Основные формулы:

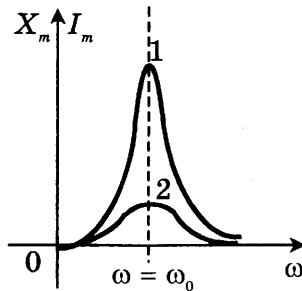
Общие формулы	Математический маятник	Пружинный маятник	Электрический контур
Период			
$T = \frac{t}{N} = \frac{1}{\nu} = \frac{2\pi}{\omega}$	$T = 2\pi\sqrt{\frac{\ell}{g}} = 2\pi\sqrt{\frac{\ell}{a_{\text{полн}}}}$	$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$	$T = 2\pi\sqrt{LC}$
Частота			
$\nu = \frac{N}{t} = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}$	$\nu = \frac{\sqrt{g}}{2\pi\sqrt{\ell}}$	$\nu = \frac{\sqrt{k}}{2\pi\sqrt{m}}$	$\nu = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$
Циклическая частота			
$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}$	$\omega = \sqrt{\frac{g}{\ell}}$	$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$	$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$
Амплитуда скорости			
$v_m = X_m\omega$	$v_m = X_m\sqrt{\frac{g}{\ell}}$	$v_m = X_m\sqrt{\frac{k}{m}}$	
Амплитуда ускорения			
$a_m = X_m\omega^2$	$a_m = X_m\frac{g}{\ell}$	$a_m = X_m\frac{k}{m}$	
Амплитуда силы			
$F_m = ma_m = mX_m\omega^2$	$F_m = mX_m\frac{g}{\ell}$	$F_m = mX_m\frac{k}{m} = X_mk$	

Вынужденные колебания

Вынужденные <i>механические</i> колебания происходят под действием внешней периодически изменяющейся силы	Вынужденные <i>электромагнитные</i> 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 приемник на частоту передающей станции

<p>Амплитуда во время резонанса в первой колебательной системе увеличивается больше, так как трение в ней меньше, чем во второй системе:</p> $F_{mp.1} < F_{mp.2}$	<p>Амплитуда тока во время резонанса в первом электрическом контуре увеличивается больше, так как сопротивление в нём меньше, чем во втором контуре:</p> $R_1 < R_2$
--	--

График вынужденных колебаний:



Переменный электрический ток

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:

$$I_{\circ} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}.$$

Действующее (эффективное) значение напряжения:

$$U_{\circ} = \frac{U_m}{\sqrt{2}}.$$

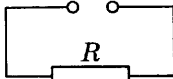
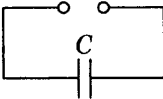
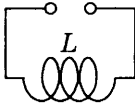
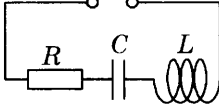
Закон Ома для действующих значений:

$$I_{\circ} = \frac{U_{\circ}}{Z}.$$

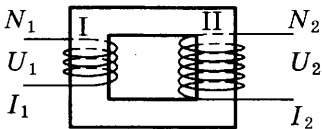
Закон Джоуля—Ленца:

$$Q = I_{\circ}^2 R t = \frac{U_{\circ}^2}{R} t.$$

Нагрузки в цепи переменного тока:

Сопrotивление	Схема	Закон Ома
Активное или омическое сопротивление R		$I_m = \frac{U_m}{R}$
Емкостное 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 холостого хода трансформатора (цепь вторичной катушки разомкнута):

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Закон рабочего хода трансформатора:

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_2}{I_1}$$

Коэффициент трансформации:

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

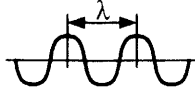
Повышающий трансформатор $k < 1$, а понижающий трансформатор $k > 1$.

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

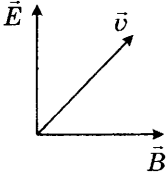
Волны

Длина волны λ (м):

- Расстояние, на которое распространится волна за время одного полного колебаний частицы (за период).
- Расстояние между двумя ближайшими «горбами» или «впадинами».



- Кратчайшее расстояние между точками, колеблющимися в фазе.

Механические волны	Электромагнитные волны
Источники волн	
Колеблющееся в упругой среде тело	Ускоренно движущаяся заряженная частица
Возникновение волн	
Если одна частица среды приходит в колебательное движение, то благодаря силам взаимодействия соседние с ней частицы также начнут колебаться	Ускоренно движущийся заряд создает переменный ток, вокруг которого возникает переменное магнитное поле. Оно порождает переменное электрическое поле, которое приводит к возникновению переменного магнитного поля и т.д.
Определение	
<i>Механическая волна</i> — процесс распространения колебаний в упругой среде	<i>Электромагнитная волна</i> — процесс распространения переменных магнитных и электрических полей
Виды волн	
В <i>поперечных</i> волнах направление колебания частиц (\vec{v}_k) перпендикулярно направлению распространения волны (\vec{v}_ϕ): $\vec{v}_k \perp \vec{v}_\phi$ (пример: волны на воде) В <i>продольных</i> волнах направление колебания частиц параллельно направлению распространения волны: $\vec{v}_k \parallel \vec{v}_\phi$ (пример: звуковые волны)	Электромагнитные волны относятся к <i>поперечным</i> волнам: $\vec{v} \perp \vec{B} \perp \vec{E}$ 

Механические волны	Электромагнитные волны
Скорость распространения	
<p>Механические волны быстрее всего распространяются в твердых средах, медленнее в жидких и еще медленнее в газах</p> <p>Механические волны в вакууме не распространяются</p>	<p>Электромагнитные волны распространяются в вакууме со скоростью света</p> $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
Длина волны	
$\lambda = v \cdot T = \frac{v}{\nu} = \frac{2\pi v}{\omega}$	<p>В вакууме</p> $\lambda = c \cdot T = \frac{c}{\nu} = c2\pi\sqrt{LC}$
Расстояние от источника до наблюдателя	
$l = vt,$ <p>где $v = \frac{\lambda}{T} = \lambda\nu = \frac{\lambda\omega}{2\pi}$, $T = \frac{t}{N}$,</p> <p>t — время движения волны от источника колебаний до наблюдателя</p>	$l = c \cdot t,$ <p>где $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$</p>
Отражение волн	
<p>Эхо — отражение звуковых волн от преграды. Расстояние до преграды $l = v_{\text{зв}} \cdot \frac{\tau}{2}$,</p> <p>$\tau$ — время движения волны от источника и обратно</p> <p>Скорость звука в воздухе $v_{\text{звук}} \approx 330 \text{ м/с}$</p>	<p>Радиолокация — способ обнаружения объекта с помощью радиоволн. Расстояние до объекта</p> $l = c \cdot \frac{\tau}{2}$ <p>Скорость радиоволн $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$</p>
Переход волны из одной среды в другую	
$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{v_1 T}{v_2 T} = \frac{v_1}{v_2}$ <p>$T = \text{const}; v = \text{const}; \omega = \text{const}$</p>	<p>Из среды в вакуум</p> $\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{v}{c}$
Расстояние между точками с известной разностью фаз	
$\Delta x = \frac{\lambda \Delta \varphi}{2\pi} = \frac{v T \Delta \varphi}{2\pi} = \frac{v \Delta \varphi}{\nu 2\pi} = \frac{v \Delta \varphi}{\omega}$ <p>Δx — разность хода</p> <p>$\Delta \varphi$ — разность фаз</p>	<p>В вакууме</p> $\Delta x = \frac{\lambda \Delta \varphi}{2\pi} = \frac{c T \Delta \varphi}{2\pi} = \frac{c \Delta \varphi}{\nu 2\pi} = \frac{c \Delta \varphi}{\omega}$
<p>Точки колеблются в фазе, если $\Delta \varphi = 2\pi$; точки колеблются в противофазе, если $\Delta \varphi = \pi$.</p>	

Радиосвязь — передача любой звуковой информации на большие расстояния с помощью радиоволн. Принцип радиосвязи: слабую электромагнитную волну звуковой частоты «сажают» на высокочастотный электромагнитный сигнал. Информация о звуковой частоте содержится в законе изменения амплитуды.

Число колебаний несущей (электромагнитной волны) частоты за период звуковой частоты при радиосвязи:

$$N = \frac{T_{\text{вб}}}{T_{\text{нсс}}},$$

где $T_{\text{зл}} = \frac{\lambda_{\text{зл}}}{c} = \frac{1}{\nu_{\text{зл}}}$; $T_{\text{вб}} = \frac{\lambda_{\text{вб}}}{\nu} = \frac{1}{\nu_{\text{вб}}}$.

Шкала электромагнитных волн. Диапазоны волн располагаются в определенной последовательности. По мере перехода от одного диапазона к другому уменьшается длина волны, а частота увеличивается.

Тип волны	Где встречаются
Низкочастотные	Линии электропередач
Радиоволны	Радиосвязь, телевидение, сотовая связь
Инфракрасное излучение	Сушка лакокрасочных покрытий, овощей и фруктов, нагревательные приборы, приборы ночного видения
<i>Видимый свет</i> 390 нм λ 770 нм	90 % информации об окружающем мире, фотосинтез
Ультрафиолетовое излучение	Пигментация кожи, выработка витамина D, бактерицидное действие
Рентгеновское излучение	В медицине — изучение внутренних органов
Гамма-излучение	Выделяется при радиоактивном распаде и при ядерном взрыве

6. ОПТИКА

Оптика — раздел физики, в котором изучают свет и световые явления.

Корпускулярно-волновой дуализм. Для объяснения световых явлений ученые (во главе с И. Ньютоном) предположили, что свет — это поток частиц (корпускул). Другие ученые (Гук, Гюйгенс) использовали представление о том, что свет — это волна. Современная наука считает, что свет имеет двойствен-

ную природу. Впервые эту идею выдвинул Луи де Бройль. Свет как поток частиц — корпускул (фотонов) проявляет себя при поглощении и излучении атомов. В других явлениях, таких, как интерференция, дифракция, дисперсия, поляризация, он ведет себя как волна.

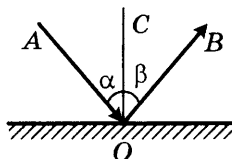
Законы геометрической оптики

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 AO , отраженный луч OB и перпендикуляр OC , восстановленный в точке падения, лежат в одной плоскости. Угол падения α равен углу отражения β .*



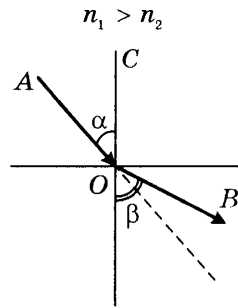
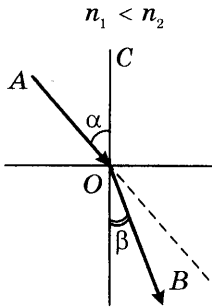
Закон отражения объясняет получение изображения в зеркале, устройство перископа.

Закон преломления выполняется, если на пути светового луча встречается граница двух прозрачных сред: *падающий луч AO , преломленный луч OB и перпендикуляр к границе двух сред OC лежат в одной плоскости.*

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2},$$

где α — угол падения, β — угол преломления; n_1 — абсолютный показатель преломления, v_1 — скорость света и λ_1 — длина волны в первой среде; n_2 — абсолютный показатель преломления второй среды, n_{21} — относительный показатель преломления первой среды относительно второй.

Абсолютный показатель преломления — табличная величина. Его определили экспериментально, рассматривая преломление света при переходе из вакуума в данную среду. Чем больше абсолютный показатель среды, тем она считается более плотной.

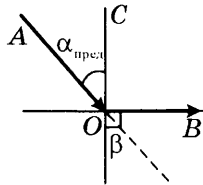


Если луч переходит из оптически менее плотной среды в оптически более плотную, то он отклоняется к перпендикуляру и $\alpha > \beta$.

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

Закон преломления объясняет возникновение миражей, рефракцию в атмосфере, явление полного отражения.

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 преломленный луч отклоняется от перпендикуляра и приближается к границе раздела двух сред.

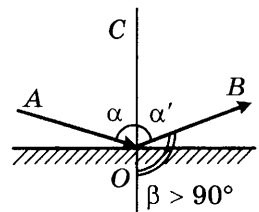


Наступает такой момент, когда угол преломления становится равным 90° . Угол падения, при котором угол преломления равен 90° , называют *предельным*:

$$\frac{\sin \alpha_{\text{пред}}}{\sin 90^\circ} = \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow \sin \alpha_{\text{пред}} = \frac{n_2}{n_1}.$$

Дальнейшее увеличение падающего угла приводит к росту угла преломления. Свет в нижнюю среду (несмотря на то, что она прозрачная) не попадает. Происходит отражение от границы двух сред:

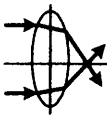

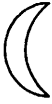
$$\begin{aligned} \alpha &= \alpha', \\ \alpha' + \beta &= 180^\circ. \end{aligned}$$



Линзы

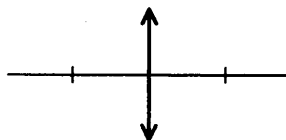
Линзы — прозрачные, обычно стеклянные тела, ограниченные двумя сферическими поверхностями.

Виды линз:

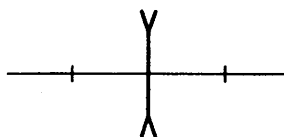
	<p>Двояковыпуклые линзы: лупа, объектив фотоаппарата, хрусталик глаза. Собирают лучи, если находятся в оптически менее плотной среде.</p>
	<p>Двояковогнутые линзы рассеивают лучи, если находятся в оптически менее плотной среде.</p>
	<p>Выпукло-вогнутые линзы обладают и рассеивающими, и собирающими свойствами. (Пример: линзы в очках.)</p>

Условные обозначения тонких линз:

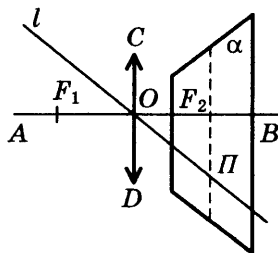
Собирающая линза



Рассеивающая линза



Собирающая линза:



AB — главная оптическая ось,

CD — положение линзы,

O — оптический центр линзы,

F_1, F_2 — фокусы линзы,

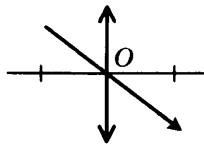
α — фокальная плоскость, проходит через фокус перпендикулярно AB ,

l — побочная оптическая ось, проходит через оптический центр,

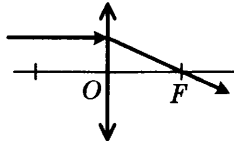
Π — побочный фокус линзы — точка пересечения побочной оптической оси и фокальной плоскости.

Ход лучей в собирающей линзе:

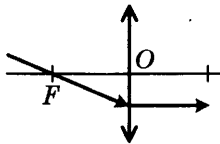
- 1) Лучи, проходящие через оптический центр линзы, не преломляются.



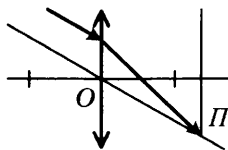
- 2) Лучи, параллельные главной оптической оси, после преломления в собирающей линзе проходят через фокус.



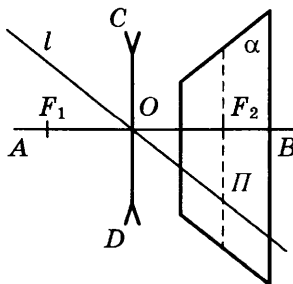
- 3) Лучи, проходящие через фокус, после преломления в собирающей линзе пойдут параллельно главной оптической оси.



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



Рассеивающая линза:



AB — главная оптическая ось,

CD — положение линзы,

O — оптический центр линзы,

F_1, F_2 — фокусы линзы,

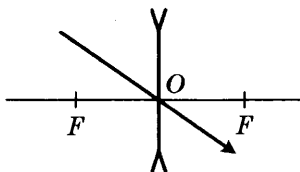
α — фокальная плоскость, проходит через фокус перпендикулярно AB ,

l — побочная оптическая ось, проходит через оптический центр,

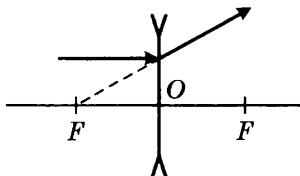
Π — побочный фокус линзы — это точка пересечения побочной оптической оси и фокальной плоскости.

Ход лучей в рассеивающей линзе:

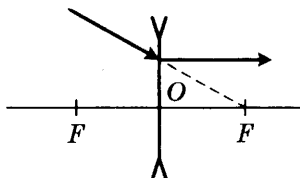
- 1) Лучи, проходящие через оптический центр линзы, не преломляются.



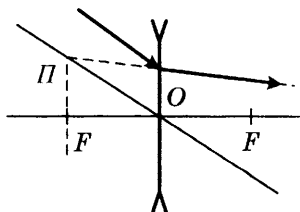
- 2) Лучи, параллельные главной оптической оси, после преломления в рассеивающей линзе выходят из фокуса.



- 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.



Знаки в формуле тонкой линзы:

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

Линейное увеличение линзы:

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

Только для действительного изображения:

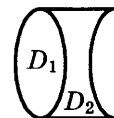
$$\Gamma = \frac{H}{h} = \frac{f}{d} = \frac{F}{d-F} = \frac{f-F}{F}.$$

Линейное увеличение через площади предмета и изображения:

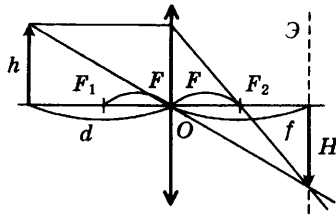
$$\Gamma = \sqrt{\frac{S_{\text{изображения}}}{S_{\text{предмета}}}}.$$

Линейное увеличение равно масштабу снимка.

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
Оптическая сила двояковыпуклой линзы	$D = \frac{1}{F} = \left(\frac{n_{\text{линзы}}}{n_{\text{среды}}} - 1 \right) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$	
Оптическая сила составной линзы	$D = D_1 + D_2$	
Оптическая сила плоско-выпуклой линзы и зеркала	$D = 2D_1$	

Действительное изображение в собирающей линзе:



Условие, при котором наблюдается такое изображение: $d > F$.

Знак фокусного расстояния: $+F$.

Знак расстояния от линзы до предмета: $+d$.

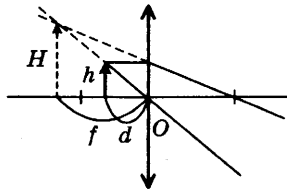
Знак расстояния от линзы до изображения: $+f$.

Формула тонкой линзы: $\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}$.

Расстояние от предмета до изображения (экрана): $f + d$.

Увеличение линзы: $\Gamma = \frac{H}{h} = \frac{f}{d} = \frac{F}{d - F} = \frac{f - F}{F}$.

Мнимое увеличенное изображение в собирающей линзе:



Условие, при котором наблюдается такое изображение: $d < F$.

Знак фокусного расстояния: $+F$.

Знак расстояния от линзы до предмета: $+d$.

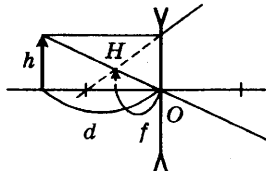
Знак расстояния от линзы до изображения: $-f$.

Формула тонкой линзы: $\frac{1}{F} = \frac{1}{d} - \frac{1}{f}$.

Расстояние от предмета до изображения: $f - d$.

Увеличение линзы: $\Gamma = \frac{H}{h} = \frac{f}{d}$.

Мнимое уменьшенное изображение в рассеивающей линзе:



Условие, при котором наблюдается такое изображение: всегда.

Знак фокусного расстояния: $-F$.

Знак расстояния от линзы до предмета: $+d$.

Знак расстояния от линзы до изображения: $-f$.

Формула тонкой линзы: $-\frac{1}{F} = \frac{1}{d} - \frac{1}{f}$.

Расстояние от предмета до изображения: $d - f$.

Увеличение линзы: $\Gamma = \frac{H}{h} = \frac{f}{d} < 1$.

Волновые свойства света

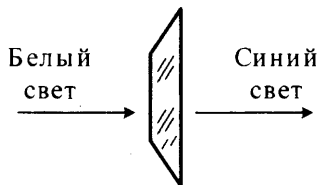
Дисперсия — явление разложения белого света в спектр. Белый свет состоит из электромагнитных волн разной частоты. Попадая в призму, эти волны по разному преломляются (больше всего преломляются волны, соответствующие фиолетовому цвету, меньше — красному) и изменяют свою скорость (быстрее всего движутся «красные волны», медленнее «фиолетовые»).

Дисперсия — зависимость абсолютного показателя преломления вещества от частоты $n = f(v)$. Пример дисперсии — *радуга*.

Радуга — это разложение белого света на каплях дождя.

Свет и цвет.

Светофильтры — прозрачные тела, которые пропускают определенные длины волн, а остальные поглощают. Пример с синим светофильтром:



После прохождения через светофильтр белый свет становится **монохроматическим**, т.е. содержит длину волны, соответствующую одному цвету.

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

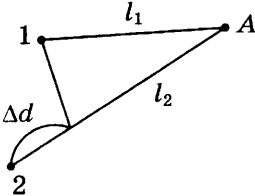
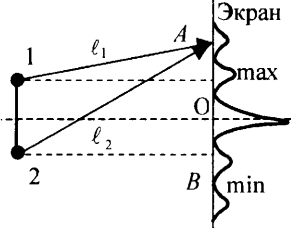
Цвет тел также зависит от цвета падающего света. Лучше всего это наблюдать, освещая белые предметы через разные светофильтры.

Поляризация.

Под поляризацией света понимают выделение из естественного света световых колебаний с определенным направлением вектора напряженности \vec{E} .

Явление поляризации доказывает волновую природу света и поперечность световых волн, т. е. $\vec{v} \perp \vec{B} \perp \vec{E}$.

Интерференция — сложение волн от когерентных источников.

Интерференция механических волн	Интерференция света
Примеры: исполнение музыки оркестром, интерференционная картина на воде	Примеры: радужная окраска мыльных пузырей и масляных пятен на воде
<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
<p><i>Разность хода</i> — разность в расстояниях от источников колебаний до изучаемой точки Δd (м)</p> $\Delta d = l_2 - l_1 $	
 <p>В точке А происходит наложение двух волн (<i>интерференция</i>).</p> <p>Если гребень одной волны наложится на гребень другой, то произойдет усиление колебаний точки А (<i>область максимума колебаний</i>).</p> <p>Если гребень одной волны наложится на впадину другой, то колебаний точки А не будет (<i>область минимума</i>)</p>	 <p>На экране наблюдается интерференция света.</p> <p>В некоторых точках наложение световых волн приводит к усилению света (А). <i>Область максимума:</i> «свет + свет = яркий свет». В других точках (В) — к его ослаблению света.</p> <p><i>Область минимума:</i> «свет + свет = темнота»</p>

Условия максимума и минимума интерференции.

Условие максимума (волны приходят в фазе):

$$\Delta d = n\lambda.$$

Условие минимума (волны приходят в противофазе):

$$\Delta d = (2n + 1) \frac{\lambda}{2}.$$

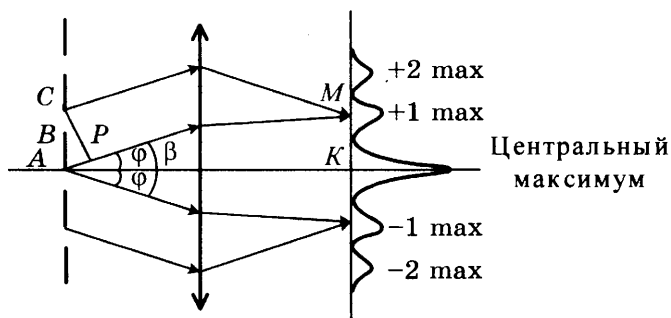
Дифракция.

Дифракция — огибание препятствий, сравнимых с длиной волны.

Примеры дифракции механических волн: слышим звук через открытую дверь.

Примеры дифракции света: радужная окраска крыльев стрекозы; образование светлых и темных полос после прохождения узкой щели.

Дифракционная решетка — прозрачная пластина, состоящая из большого числа параллельных щелей. Если на дифракционную решетку падает монохроматический свет, то на экране получают интерференционную картину — чередование светлых и темных полос.



AB — непрозрачная часть решетки,

BC — прозрачная часть,

$AC = AB + BC = d$ — период решетки, постоянная решетки,

AP — разность хода соседних параллельных лучей,

$AK = b$ — перпендикуляр к решетке (расстояние от решетки до экрана),

K — центральный (главный) максимум,

$KM = a$ — расстояние от центрального максимума до максимума n -ого порядка,

ϕ — угол отклонения луча от перпендикуляра,

N — число штрихов на длину l ,

$AP = d \sin \phi$ — разность хода параллельных лучей.

Изменения дифракционной картины. Если на дифракционную решетку падает белый свет, то в центре будет белая полоса (выполняется условие максимума для всех волн). По обе стороны от нее располагаются чередующиеся радужные полосы.

Условие максимума для наибольшей длины волны в определенной спектральной полоске:

$$d \frac{a_1}{b} = n\lambda_{\max}.$$

Условие максимума для наименьшей длины волны в той же спектральной полоске:

$$d \frac{a_2}{b} = n\lambda_{\min}.$$

Ширина спектра: $a_1 - a_2$.

Если изменить длину волны падающего на дифракционную решетку света, то положение интерференционных полос будет смещаться.

Условие максимума для первой волны:

$$d \frac{a_1}{b} = n\lambda_1.$$

Условие максимума для новой волны:

$$d \frac{a_2}{b} = n\lambda_2.$$

Если изменить дифракционную решетку (число штрихов), то положение интерференционных полос также будет смещаться.

Условие максимума для первой решетки:

$$\frac{\ell}{N_1} \frac{a_1}{b} = n\lambda.$$

Условие максимума для новой решетки:

$$\frac{\ell}{N_2} \frac{a_2}{b} = n\lambda.$$

Если дифракционную решетку повернуть на 90° , то дифракционная картина также повернется на 90° .

7. СПЕЦИАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Принципы относительности Галилея:

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

2. Правило сложения скоростей

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

Принципы относительности Эйнштейна:

1. Все физические процессы в инерциальных системах отсчета протекают одинаково.
2. Скорость света в вакууме одинакова для всех инерциальных систем отсчета. Она не зависит ни от скорости источника, ни от скорости приемника:

$$c = \text{const}, \quad c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с.}$$

Согласно теории Эйнштейна во всех инерциальных системах отсчета физические законы имеют одинаковую форму.

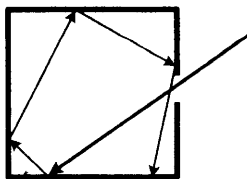
Следствия из теории относительности Эйнштейна (*релятивистские эффекты*):

<p>Связь массы и энергии</p> $E = mc^2$ $\Delta E = \Delta mc^2$	<p>Уменьшение длины</p> $l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$	<p>Увеличение интервалов времени</p> $t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$
<p>Сложение скоростей</p> $v' = \frac{v + u}{1 + \frac{vu}{c^2}}$	<p>Увеличение массы</p> $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$	<p>Релятивистский импульс</p> $p = mv = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{E_{\text{полн}}}{c^2} v$
<p>Полная энергия</p> $E_{\text{полн}} = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ $E_{\text{полн}} = c \sqrt{p^2 + m_0^2 c^2}$	<p>Кинетическая энергия</p> $E_k = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - m_0 c^2$	<p>Работа равна изменению энергии</p> $A = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v_2^2}{c^2}}} - \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v_1^2}{c^2}}}$

8. КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

Тепловое излучение

В начале XX в. попытки объяснить явления теплового излучения, фотоэффекта и др. привели к созданию квантовой теории.

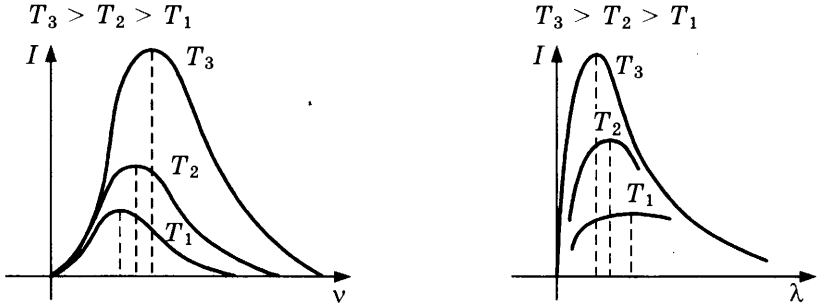


Модель абсолютно черного тела

Если нагреть стенки абсолютно черного тела, то интенсивность излучения не зависит от материала, из которого стенки изготовлены, а определяется только их температурой. Солнце и звезды имеют подобное излучение.

Цвет абсолютно черного тела может быть любым и зависит от температуры. Например, холодным звездам (3000 °С) соответствует красный цвет, более нагретым (6000 °С) — желтый, самым горячим — голубой (10 000 °С).

Экспериментальная зависимость излучения абсолютно черного тела от температуры:



С ростом температуры интенсивность излучения растет, и максимум интенсивности смещается в область коротких волн (или больших частот).

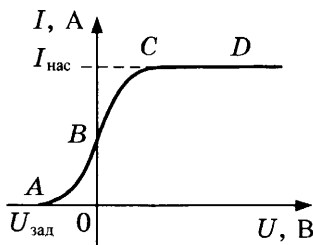
Для объяснения этой зависимости ученые предположили, что энергия излучается порциями (квантами). Энергия кванта пропорциональна частоте (или обратно пропорциональна длине волны):

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda},$$

где $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж · с — постоянная Планка.

Фотоэффект

Фотоэффект — явление вырывания электронов из металла под действием света.



Вольт-амперная характеристика (световой поток, освещенность, интенсивность излучения не изменяются)

1. *Точка В* ($U = 0$). 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 А*. При некотором значении обратного напряжения ток прекращается. Это напряжение называют *задерживающим*.

Законы фотоэффекта:

1. Сила тока насыщения прямо пропорциональна освещенности катода E (или падающему световому потоку Φ , или интенсивности излучения I , или числу фотонов, падающих на электрод в единицу времени) и не зависит от частоты падающего света:

$$I_{\text{нас.}} = f(E) = \varphi(\Phi) = \psi(I).$$

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

3. Для каждого вещества существует *красная граница фотоэффекта* — наименьшая частота ν_{min} (или наибольшая длина волны λ_{max}), при которой еще возможен фотоэффект.

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

Формула Эйнштейна:

$$E_{\phi} = A_{\text{вых}} + E_k.$$

Энергия фотона:

$$E_{\phi} = h\nu = \frac{hc}{\lambda}.$$

Работа выхода — это энергия взаимодействия электрона с ядром:

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

Кинетическая энергия электрона:

$$E_k = \frac{m_e v^2}{2} = q_e U_{\text{зад}}.$$

Световые кванты

Энергия фотона	$E_0 = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = m_0c^2$
Масса фотона	$m_0 = \frac{E_0}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{h}{c\lambda}$
Импульс фотона	$p_0 = m_0c = \frac{E_0}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h\nu}{\lambda}$
Заряд фотона	$q = 0$
Число фотонов	$N = \frac{E}{E_0} = \frac{Pt}{E_0} = \frac{m_{\text{всех}}}{m_0}$
Импульс, переданный телу, при поглощении фотона	$p = 2m_0c = 2\frac{E_0}{c} = 2\frac{h\nu}{c} = 2\frac{h\nu}{\lambda}$
Давление света при поглощении	$p = \frac{W}{tSc} = \frac{I}{c}$ (Па)
Давление света при зеркальном отражении	$p = \frac{2W}{tSc} = \frac{2I}{c}$ (Па)
Сила давления света	$F = pS_{\text{нов}}$ (Н)

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.

Модель Томсона — «пудинг с изюмом».

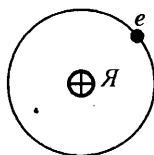
По мнению Томсона, весь атом заполнен положительным зарядом, а в него, как изюминки, вкраплены электроны.



Резерфорд решил проверить модель Томсона.

Он изучал рассеяние α -частиц (положительные частицы образуются при радиоактивном распаде, их масса сравнима с массой атома).

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 элек-

тромагнитную 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:

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

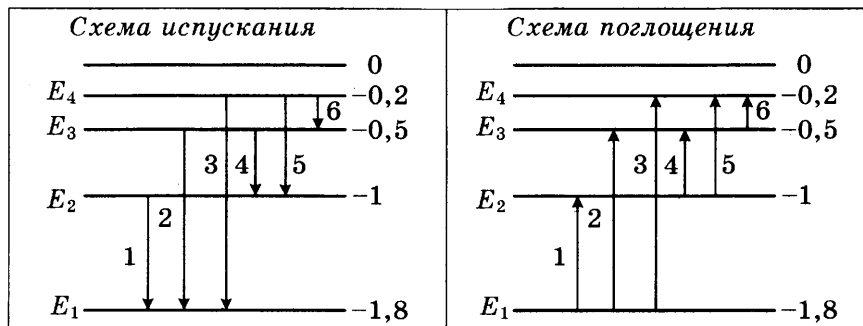
Элементарная боровская теория атома водорода:

Момент импульса квантуется (III постулат Бора)	$mvr = \frac{nh}{2\pi}$
Закон Ньютона и закон Кулона	$\frac{q_e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{m_e v^2}{r}$ $r_n = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi q_e^2 m_e} n^2 = r_1 n^2$
Выразим скорость v	$v_n = \frac{q_e^2}{2\epsilon_0 h} \cdot \frac{1}{n} = \frac{v_1}{n}$
Кинетическая энергия	$E_k = \frac{m_e v^2}{2} = \frac{q_e^2}{8\pi\epsilon_0 r} = \frac{m_e q_e^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \cdot \frac{1}{n^2}$
Потенциальная энергия	$E_p = -\frac{kq_1 q_2}{r} = -\frac{q_e^2}{4\pi\epsilon_0 r} = -\frac{m_e q_e^4}{4\epsilon_0^2 h^2} \cdot \frac{1}{n^2}$
Полная энергия	$E = E_k + E_p = -\frac{q_e^2}{8\pi\epsilon_0 r} = -\frac{m_e q_e^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \cdot \frac{1}{n^2}$
Частота излучения	$h\nu = \frac{m_e q_e^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \cdot \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right)$ или $\nu = R \cdot \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right),$ где $k > n$, $R = 3,3 \cdot 10^{15}$ Гц
Длина волны	$\lambda = \frac{hc}{E_k - E_n}$
Импульс кванта	$p = \frac{E_k - E_n}{c}$

Эта теория смогла объяснить только закономерности в атоме водорода. Для гелия она уже не работала.

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

Схема возможных переходов электрона в атоме



Энергия электрона в атоме отрицательна.

Чем ближе к ядру, тем больше числовое значение энергии.

На бесконечности энергия равна нулю.

Спектральный анализ — исследование спектров от различных источников.

Виды спектров.

Непрерывный (сплошной) спектр получают от раскаленных твердых и жидких тел, сильно сжатых газов, Солнца. Он представляет собой непрерывную радужную полоску.

Линейчатый спектр испускания получают от разогретых веществ в газообразном атомарном состоянии. Внешне он представляет собой набор ярких цветных линий на черном фоне.

Линейчатый спектр поглощения можно получить, если белый свет пропустить через вещество в газообразном атомарном состоянии. Внешне он представляет собой набор черных линий на непрерывном спектре.

Mg									
N									
Газ									

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.

Например, при сравнении спектра поглощения неизвестного газа и известных спектров поглощения магния и азота можно определить химический состав газа. Неизвестный газ состоит из магния и азота.

Атомное ядро

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 ${}^A_Z X$, где Z — порядковый номер химического элемента в таблице химических элементов Д.И. Менделеева, A — массовое число (или атомная масса).

Число протонов в ядре (равно числу электронов в атоме) определяется порядковым номером химического элемента Z .




Число нейтронов: $N = A - Z$.

Схемы атомов

${}^1_1\text{H}$	${}^4_2\text{He}$	${}^7_3\text{Li}$
		

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

Изотопы водорода

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

Ядерные силы. Между протонами и нейтронами действуют силы другой природы (не электрической). Эти силы называют ядерными. Причем 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:

$$m_x < Zm_p + Nm_n .$$

Дефект массы:

$$\Delta m = Zm_p + Nm_n - m_x \text{ (а.е.м.)}$$

$$1 \text{ а.е.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг} .$$

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

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

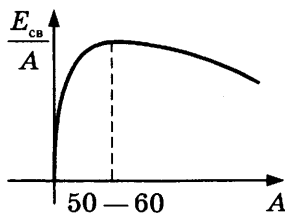
$$1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} .$$

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

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

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.



Зависимость удельной энергии связи от массового числа

Из графика видно, что энергетически выгодно деление тяжелых ядер и слияние легких.

Радиоактивность

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

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

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

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

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

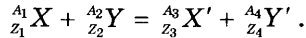
Закон радиоактивного распада:

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

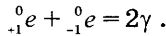
где $N(m)$ — число (масса) *не распавшихся* ядер в момент времени t , $N_0(m_0)$ — начальное число (первоначальная масса) *не распавшихся* ядер; T — период полураспада.

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

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



Аннигиляция позитрона и электрона:



При аннигиляции электрона и позитрона рождаются два или более γ -кванта в соответствии с законом сохранения импульса.

Законы сохранения:

$$\Sigma Z = \Sigma Z'$$

$$\Sigma A = \Sigma A'$$

$$\Sigma N = \Sigma N'.$$

В ядерных реакциях закон сохранения заряда выполняется полностью, а закон сохранения массы «нарушается». Изменение массы связано с выделением или поглощением энергии.

9. КРАТКИЕ СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ

Десятичные приставки

Наименование	Обозначение	Множитель
гига	Г	10^9
мега	М	10^6
кило	к	10^3
гекто	г	10^2
деци	д	10^{-1}
санتي	с	10^{-2}
милли	м	10^{-3}
микро	мк	10^{-6}
нано	н	10^{-9}
пико	п	10^{-12}

Константы

число π	$\pi = 3,14$
ускорение свободного падения	$g = 10 \text{ м/с}^2$
гравитационная постоянная	$G = 6,7 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$
газовая постоянная	$R = 8,31 \text{ Дж} / (\text{моль} \cdot \text{К})$