

# ФИЗИКА ДЛЯ АБИТУРИЕНТОВ

Часть 1

Учебно-методическое пособие

Москва 2021

**Алексеев М.В.**

Физика для абитуриентов. Ч.1: учебно-методическое пособие

Учебно-методическое пособие «Физика для абитуриентов» содержит теоретические и практические материалы по курсу физики в рамках школьной программы, необходимые для успешной сдачи вступительного экзамена в ИКСИ.

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Содержание этой книги соответствует программе курса физики, изучаемого в средней школе. Достаточно полно описываются разделы программы, которые, как показала практика приемных экзаменов на факультеты ИКСИ, наиболее сложны для поступающих.

Цель учебно-методического пособия – помочь читателю освоить материал программы, научить активно применять теоретические основы физики как рабочий аппарат, позволяющий решать конкретные задачи, и приобрести уверенность в самостоятельной работе. Для этого необходимо ясно представлять смысл физических понятий, изучить физические законы и овладеть элементами математической культуры - алгеброй, тригонометрией, техникой тождественных преобразований.

# 1 МЕХАНИКА

## 1.1 КИНЕМАТИКА

### 1.1.1 Введение в кинематику

**Механика** - это раздел физики посвященный изучению закономерностей механического движения.

**Механическое движение** - это изменение положения в пространстве тел или их частей относительно других тел, происходит с течением времени (т.е. движение происходит в пространстве и во времени).

**Классическая (ньютоновская) механика** - изучает движение макроскопических тел при скоростях много меньших скорости света.

**Релятивистская механика** - изучает движение тел при скоростях соизмеримых со скоростью света.

**Квантовая (волновая) механика** - изучает движение микрочастиц.

**Кинематика** - это раздел механики, который посвящен описанию движения без рассмотрения причин, которые обеспечивают возникновение конкретного вида движения.

**Материальная точка (МТ)** - это тело, форма и размеры которого не существенны при решении конкретных задач.

**Абсолютно твердое тело (АТТ)** - это тело, форма и размеры которого существенны в данной задаче, а деформация (изменение формы и размеров) не существенна (т.е. нас она не интересует)

**Механическая система** - это набор тел, рассматриваемых в данной задаче. Любую механическую систему можно представить, как совокупность большого числа МТ.

**Физические величины (ФВ)** - это те характеристики тел системы, процессы которых поддаются количественному определению.

ФВ делятся на две группы - скалярные и векторные.

**Скалярные ФВ** - это те характеристики физических тел и процессов, которые полностью задаются числами, которые

могут быть положительными и отрицательными.

**Векторные ФВ** - это те ФВ, которые определяются как численным обозначением, так и направлением в пространстве.

**Тело отсчета** - это тело, которое условно считают неподвижным и относительно которого определяют положение в пространстве других тел. Если тело отсчета не материальная точка, то на нем выбирают точку, называемую началом отсчета.

Положение МТ в пространстве может быть задано двумя способами:

1) С помощью направленного отрезка Радиуса-вектора ( $\vec{R}$ ) соединяющего начало координат и интересующую нас МТ.

2) С помощью 3 скалярных величин - проекций интересующей нас материальной точки на 3 взаимно перпендикулярные координатные оси; начало координат обычно совпадает с началом отсчета

$$\begin{array}{l} \text{Координаты тела} \\ |\vec{R}| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \end{array}$$

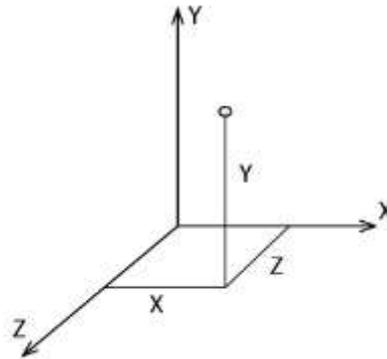


Рис.1 Декартова система координат

Для измерения времени служат различные периодические процессы, происходящие в природе: смена времен года, смена фаз луны, смена дня и ночи и в созданных человеком устройствах - часах.

**Система отсчета** - это тело отсчета и совмещенный с ним прибор для измерения времени (часы).

**Уравнение движения** - это уравнения, позволяющие по известным начальным условиям найти тело или систему в любой момент времени.

**Кинематические уравнения движения** - это уравнения, определяющие координату или радиус вектор любой точки в любой момент времени.

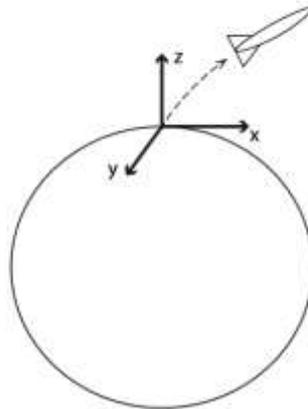


Рис.2. Система отсчета

**Траектория** - это линия, которая описывает в пространстве движение МТ; траектория обязательно является непрерывной линией.

**Путь** - это скалярная ФВ, равная длине траектории.

**Перемещение МТ** (за промежуток времени от  $t_1$  до  $t_2$ ) - это направленный отрезок, соединяющий положение точки в момент  $t_1$  с положением в момент  $t_2$

$$\vec{r}(t_2) - \vec{r}(t_1) = \Delta\vec{r}$$

$\Delta\vec{r}$  – перемещение

### 1.1.2 Кинематика равномерного движения

**Равномерное движение** - это такое движение, при котором за любые равные промежутки времени тело совершает одинаковые перемещения.

**Скорость** - это векторная ФВ. численно равная перемещению за единицу времени, при условии, что движение является равномерным.

$$\vec{v} = \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t} = \frac{\vec{r}(t_2) - \vec{r}(t_1)}{t_2 - t_1}$$

Равномерное движение:

$$\Delta\vec{r}_1 = \Delta\vec{r}_2 = \dots = \Delta\vec{r}_n,$$

$$\Delta t_1 = \Delta t_2 = \dots = \Delta t_n,$$

Не трудно видеть, что существует векторная физическая величина, которая характеризует данное движение и не зависит от выбранного интервала времени:

$$\vec{v} = \frac{\Delta\vec{r}_1}{\Delta t_1} = \frac{\Delta\vec{r}_2}{\Delta t_2} = \dots = \frac{\Delta\vec{r}_n}{\Delta t_n}$$

$$\vec{r}(t) = r_0 + \vec{v}t$$

$$x(t) = x_0 + v_x t$$

$$y(t) = y_0 + v_y t$$

$$z(t) = z_0 + v_z t$$

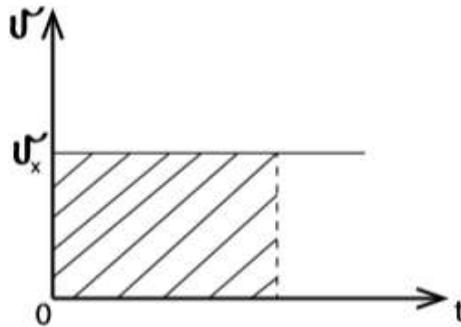


Рис. 3. Зависимость проекции скорости от времени при равномерном движении

Геометрическая интерпретация площади, ограниченной графиком проекции скорости и осями координат численно равна проекции перемещения.

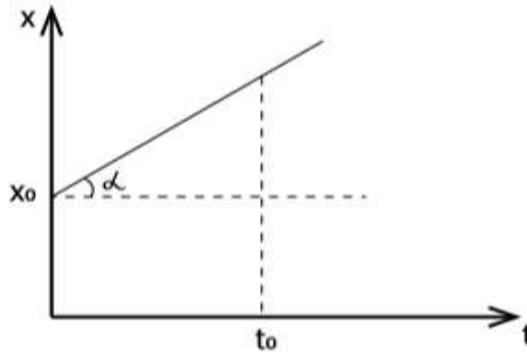


Рис.4. График зависимости координаты  $x(t)$  при равномерном движении

Геометрическая интерпретация тангенс угла наклона графика  $x(t)$  при равномерном движении численно равен проекции скорости  $v_x$ .

$$x(t) = x_0 + v_x t$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{x - x_0}{t}$$

$$v_x = \frac{x - x_0}{t}$$

$$\operatorname{tg} \alpha = v_x$$

#### Классический закон сложения скоростей

Если есть движущееся тело, скорость которого измеряется относительно двух систем отсчета (СО), Новая (условно подвижная система отсчета), Старая (условно неподвижная система отсчета), при этом наблюдатель в Старой СО измеряет скорость Новой СО относительно себя, тогда:

$$\vec{U} = \vec{V} - \vec{V}_0,$$

где  $u$  - скорость тела в Новой системе отсчета,  
 $v$  - скорость тела в Старой системе отсчета,  
 $v_0$  - относительная скорость Старой системы отсчета относительно Новой,

Старой СО называется та СО относительно которой измеряется скорость Новой.

### 1.1.3 Кинематика равноускоренного движения

Равномерное движение: равноускоренное движение:

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{a} = 0 \\ \vec{v} = \vec{v}_0 = \overline{const} \\ \Delta \vec{r} = \vec{v}t \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \vec{a} = \overline{const} \\ \vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t \\ \Delta \vec{r} = \vec{v}_0t + \frac{\vec{a}t^2}{2} \end{array} \right.$$

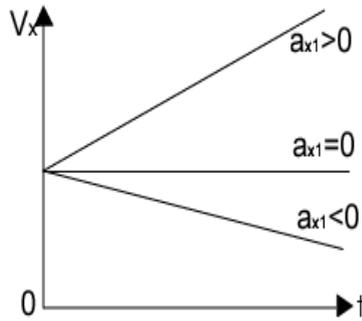


Рис.5

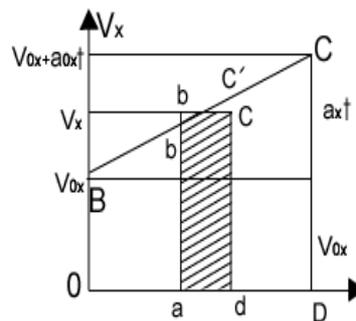


Рис.6

**Равнозамедленное движение** - это частный случай равноускоренного движения и описывается теми же векторными уравнениями.

Движение называется равнозамедленным, если:

- 1) Траектория прямолинейна;
- 2) Начальная скорость и ускорение противоположны по направлению (угол между ними -  $180^\circ$ ).

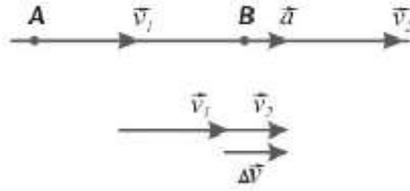


Рис.7. Равноускоренное движение

$$\begin{cases} v = v_0 + at \\ x - x_0 = v_0 t + \frac{at^2}{2} \end{cases}$$

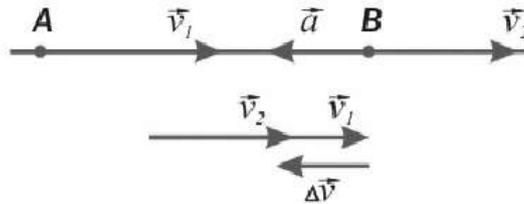


Рис.8. Равнозамедленное движение

$$\begin{cases} v = v_0 - at \\ x - x_0 = v_0 t - \frac{at^2}{2} \end{cases}$$

**Свободное падение** - это движение тела под действием только лишь силы тяжести. Свободное падение можно считать равноускоренным движением лишь в том случае, если движение происходит в малой области пространства (линейные размеры области много меньше радиуса Земли).

Ускорение свободного падения в данной точке не зависит от свойства тела. При переходе к другой точке ускорение свободного падения может изменяться как по величине, так и по направлению (рисунок).

На поверхности Земли ускорение свободного падения имеет величину:  $g=9.8\text{м/с}^2$

### Пример 2.1

Рассмотрим движение тела, брошенного с поверхности Земли с начальной скоростью  $v_0$  под углом  $\alpha$  к горизонту.

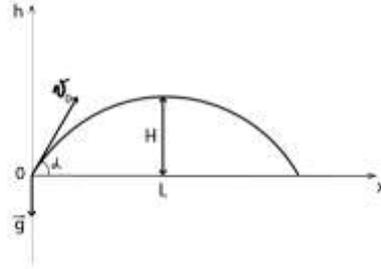


Рис.9

### Решение

Если  $v_0$  не очень велика (мала по сравнению со скоростью звука), то можно пренебречь сопротивлением воздуха, т.е. ускорение будет определяться только лишь притяжением Земли. Движение можно считать равноускоренным, ускорение направлено вертикально вниз, его величина  $g$ .

Введем координатные оси  $x$  - горизонтальная ось,  $y$  - вертикальная, начало координат совместим с начальным положением тела.

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{a} = \overline{const} \\ \vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t \\ \Delta\vec{r} = \vec{v}_0t + \frac{\vec{a}t^2}{2} \end{array} \right. \left| \begin{array}{l} a_x = 0 \\ a_y = -g \\ v_x = v_0 \cos \alpha \\ v_y = v_0 \sin \alpha - gt \\ x = v_0 \cos \alpha t \\ y = v_0 \sin \alpha t - \frac{gt^2}{2} \end{array} \right.$$

Найдем уравнение траектории  $y=f(x)$  для этого из двух последних уравнений исключим время  $t$

$$t = \frac{x}{v_0 \cos \alpha}$$

$$y = \frac{v_0 \sin \alpha}{v_0 \cos \alpha} x - \frac{g}{2v_0^2 \cos^2 \alpha} x^2$$

$$y = x \operatorname{tg} \alpha - \frac{g}{2v_0^2 \cos^2 \alpha} x^2$$

Найдем дальность полета по горизонтали  $L$ . Для этого учтем, что в момент падения  $y=0$

$$x \left( \operatorname{tg} \alpha - \frac{g}{2v_0^2 \cos^2 \alpha} x \right) = 0$$

$$L = \frac{\operatorname{tg} \alpha 2v_0^2 \cos^2 \alpha}{g} = \frac{v_0^2 2 \sin \alpha \cos \alpha}{g} = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g}$$

При каком значении угла  $\alpha$  дальность полета оказывается максимальной? Наибольшее значение  $x$  будет при  $\alpha = 45^\circ$ , т.к. максимум получается при  $\sin 2\alpha = 1$ .

Найдем полное время полета:

$$y = v_0 \sin \alpha t - \frac{gt^2}{2}$$

$$y = 0 \text{ в конце полета}$$

$$v_0 \sin \alpha t - \frac{gt^2}{2} = 0$$

$$t_1 = 0$$

$$t_2 = \frac{2v_0 \sin \alpha}{g}$$

$t_1$  - соответствует моменту времени начала полета,  $t_2$  - моменту приземления.

Тело поднимется на максимальную высоту за время,  $t = \frac{t_2}{2}$ .

$$H = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g}, \text{ где } H - \text{максимальная высота подъема.}$$

Относительность механического движения заключается в том, что характеристика движения (равномерное, неравномерное, прямолинейное, криволинейное) зависит от выбора системы отсчета.

#### 1.1.4 Кинематика криволинейного движения

**Криволинейное движение** - это движение, при котором траектория представляет собой кривую линию.

**Мгновенная скорость** движущегося тела в любой точке криволинейной траектории направлена по касательной к траектории в этой точке, она равна пределу отношения перемещения тела к интервалу времени, в течение которого это перемещение пройдено при условии, что интервал времени стремится к 0:

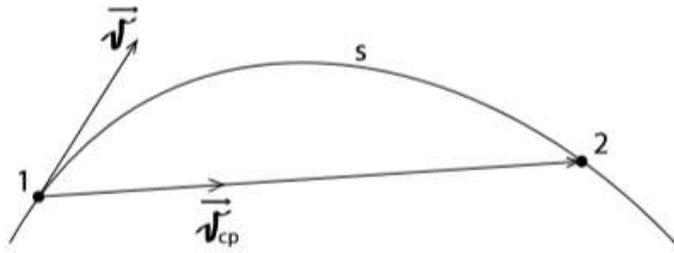


Рис.10. Скорость и средняя скорость при криволинейном движении

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

**Средняя скорость (перемещения)** - отношения перемещения тела к интервалу времени, в течение которого это перемещение пройдено

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

**Средняя путевая скорость** - отношения пути, пройденного телом к интервалу времени, в течение которого этот путь пройден

$$v_{\text{cp.п}} = \frac{S}{\Delta t}.$$

**Ускорение** тела равно пределу отношения приращения скорости к интервалу времени, в течение которого это приращение произошло при условии, что интервал времени стремится к 0:

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

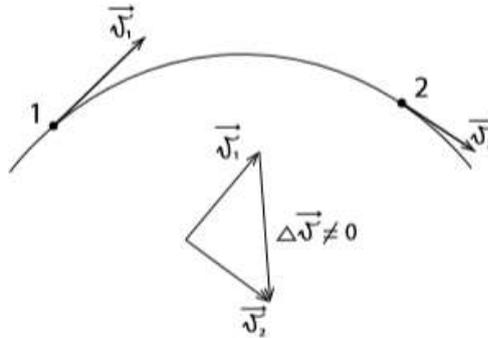


Рис. 11. Ускорение

Поэтому даже если модуль скорости не изменяется, ускорение оказывается отличным от нуля (см. рисунок).

Ускорение может составлять с направлением движения произвольный угол.

Ускорение удобно разложить на две составляющие:

1) **Тангенсальное** ( $a_\tau$ ) ускорение - направлено по касательной к траектории.

2) **Нормальное** ( $a_n$ ) - направлено перпендикулярно касательной.

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

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

Тангенсальное ускорение определяет изменение модуля скорости  $a_\tau = \frac{\Delta v}{\Delta t}$ .

Нормальное ускорение определяет изменение направления скорости  $a_n = \frac{v^2}{R}$ , где  $R$  - радиус кривизны траектории (малый участок криволинейной траектории можно представить как дугу окружности радиусом  $R$  - в точке перегиба кривизна равна 0,  $R_{\text{перегиба}} = \infty$ ).

Криволинейное движение называется равномерным, если за любые равные промежутки времени тело проходит одинаковые пути (т.е. модуль скорости не изменяется)

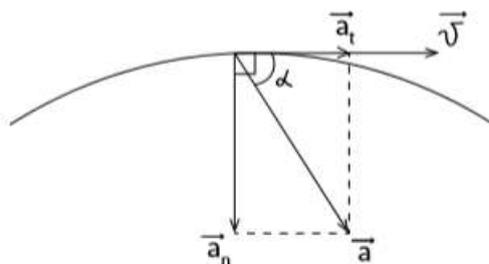


Рис.12. Нормальное и тангенциальное ускорения

Частный случай - равномерное движение по окружности - такое движение, при котором траектория представляет собой окружность, а модуль скорости при движении не изменяется.

Характеристики равномерного движения по окружности:

- 1) Радиус окружности ( $R$ ).
- 2) Скорость (линейная скорость)  $v = \frac{\Delta l}{\Delta t}$ ;
- 3) Угловая скорость  $\omega = \frac{\varphi}{\Delta t}$ ,  $\Delta l = \varphi R$ ,  $\omega = \frac{v}{R}$ ;

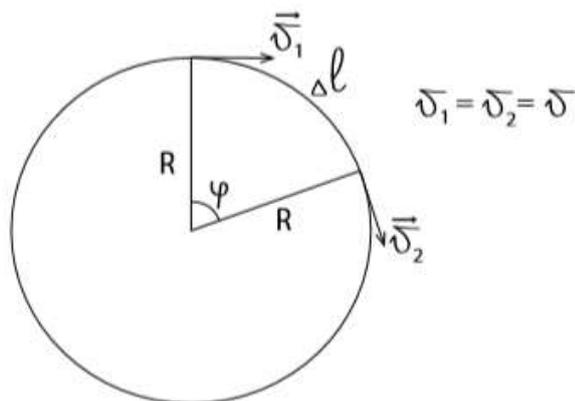


Рис.13

4) Период обращения - это время за которое материальная точка проходит путь равный длине окружности.  $T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi}{\omega}$ ;

5) Ускорение  $a_t = 0$ ;  $a = a_n = \frac{v^2}{R} = \omega^2 R$  ускорение - центростремительное, т.к. направлено к центру окружности.

### 1.1.5 Кинематика абсолютно твердого тела (АТТ)

Произвольное движение АТТ можно рассматривать как два одновременно происходящих движения: поступательное и вращательное.

**Поступательное движение** - это такое движение, при котором все точки тела описывают одинаковые траектории. При этом любая прямая, жестко связанная с телом, остается параллельной своему начальному положению.

**Вращательное движение** - это такое движение, при котором все точки тела движутся по окружностям, центры которых лежат на одной прямой, называемой осью вращения (ось вращения не обязательно проходит через тело).

**Пример.** Рассмотрим равномерное движение колеса по плоской поверхности без скольжения. При таком движении центр колеса движется по прямолинейной траектории с постоянной скоростью. Скорость точки колеса, которая соприкасается с поверхностью совпадает со скоростью точек поверхности (это означает без скольжения). Если система отсчета связана с поверхностью, по которой катится колесо, то эта скорость равна нулю.

Вопрос: Каковы  $\vec{v}$  и  $\vec{a}$  произвольной точки колеса.

Для ответа на поставленные вопросы представим указанное движение, как сумму двух движений: поступательного и вращательного.

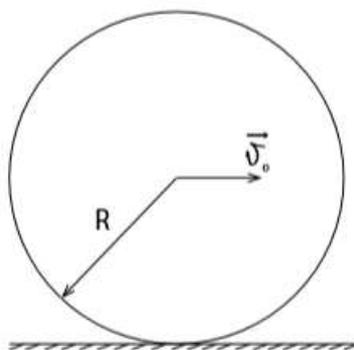


Рис.14

1) Поступательное - все точки колеса имеют одинаковые скорости, равные скорости оси колеса. Ускорение всех точек колеса равно нулю.

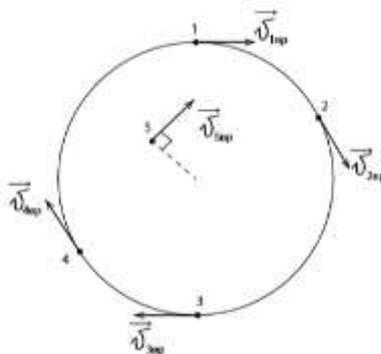


Рис.15

2) Вращательное - ось колеса неподвижна, вращение происходит вокруг оси со скоростью  $\omega$ . Скорость произвольной точки колеса во вращательном движении имеет величину  $v_{i\text{вр}} = \omega r_i$ ,  $r_i$  - расстояние от точки до оси колеса. Направлена скорость перпендикулярно отрезку  $r_i$ . Ускорение в произвольной точке колеса в любой момент направле-

но к оси колеса  $a_i = \omega^2 r_i$ .

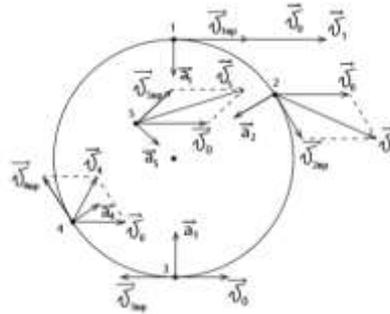


Рис.16

Чтобы получить истинную скорость (или ускорение) конкретной точки колеса, нужно найти векторную сумму скоростей (или ускорений), которыми обладает данная точка в составляющих движениях.

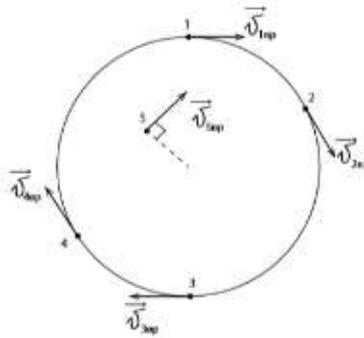


Рис.17

Точка 3 соприкасается с дорогой и если движение колеса происходит без проскальзывания, то ее скорость равна 0, следовательно,  $v_{\text{звр}} = v_0$ . Точка 3 лежит на ободе колеса и вращается по окружности радиуса  $R$ , следовательно,

$$\omega = \frac{v_0}{R}$$

Если необходимо найти только скорость произвольной точки колеса, то указанное движение можно рассматривать как вращение относительно мгновенной оси, проходящей перпендикулярно плоскости колеса, через точку касания колеса поверхности.  $v_i = \omega l_i$ , где  $l_i$  - расстояние от точки до мгновенной оси.

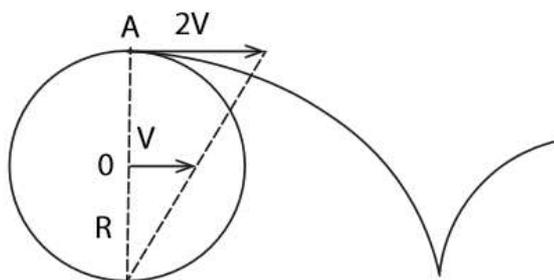


Рис.18

Направлена  $v_i$  перпендикулярно отрезку  $l_i$ .  
Циклоида - траектория движения точки на ободе колеса

## 1.2. ДИНАМИКА

### 1.2.1 Динамика материальной точки

**Динамика** - это раздел механики в котором изучается влияние взаимодействия между телами на их механическое движение.

#### I ЗАКОН НЬЮТОНА:

Существуют такие системы отсчета, в которых МТ сохраняет состояние покоя, или равномерное и прямолинейное движение, если на нее не действуют другие тела.

В общем случае характер движения тела – равномерное или неравномерное определяется выбором системы отсчета.

I Закон Ньютона позволяет из всевозможных систем отсчета выбрать инерциальную.

**Инерциальные системы отсчета (ИСО)** - это такие СО, в которых МТ свободная от внешних воздействий, покоится или движется равномерно и прямолинейно (т.е. это такие системы отсчета, в которых выполняется I Закон Ньютона).

I Закон Ньютона неявно включает в себя утверждение, что все тела обладают особым динамическим свойством, которое называют инертностью.

**Инертность** проявляет себя в том, что состояние покоя и равномерное и прямолинейное движение не требуют для своего поддержания внешнего воздействия.

В ИСО единственной причиной появления у тела ускорения, является действие других тел, т.е. действие сил.

**Сила (F)** - векторная ФВ, которая является количественной мерой механического действия на данное тело со стороны другого тела и которое сопровождается:

- а) появлением у тела ускорения;
- б) деформацией тела, если оно не МТ.

Оба действия силы могут быть использованы для измерения ее величины.

Сила характеризуется:

1. численным значением;

2. направлением;
3. точкой приложения.

Линия действия силы – это прямая, вдоль которой действует сила.

Если тело является абсолютно-твердым телом, то силу можно переносить вдоль линии действия силы в пределах тела.

На тело может действовать несколько сил одновременно.

**Равнодействующая** (резльтирующая)  $F$  - это сила, действие которой эквивалентно одновременному действию на МТ нескольких сил.  $\vec{F}_p = \sum_{i=1}^N \vec{F}_i$ ; (если тело не МТ, то равнодействующей может не быть вовсе).

**II ЗАКОН НЬЮТОНА:**

Ускорение тела пропорционально силе на него действующей.

Закон справедлив, если:

- 1) Система отсчета инерциальная;
- 2) Тело - МТ;
- 3) Если тело не МТ, но оно движется поступательно;
- 4) Масса тела при движении не изменяется.

$$m\vec{a} = \sum_{i=1}^N \vec{F}_i;$$

Принцип независимости действия сил заключается в том, что каждая сила сообщает телу такое же ускорение, как если бы других сил не было.

$$\vec{a} = \sum_{i=1}^N \vec{a}_i.$$

**Масса** - скалярная ФВ (положительная), которая является мерой инертности тел.

**Механическая система** - это набор тел, рассматриваемых в данной задаче.

**Внешние тела** – тела, не вошедшие в рассматриваемую систему.

**Внешние силы** - силы, с которыми внешние тела дейст-

вуют на тела системы.

**Внутренние силы** - силы, с которыми тела системы действуют друг на друга.

**Замкнутая система** - система, на тела которой не действуют другие силы.

### III ЗАКОН НЬЮТОНА:

В инерциальных системах отсчета действие одного тела на другое, носит характер взаимодействия.

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$$

Две материальные точки действуют друг на друга с силами равными по величине и направленными вдоль одной прямой в противоположные стороны.

III Закон Ньютона позволяет перейти от динамики материальной точки к динамике системы материальных точек.

Следовательно, в любой механической системе сумма внутренних сил равна нулю.

**Центр массы (центр инерции) системы МТ (ЦМ)** - это точка, положение которой в пространстве определяется радиусом вектором ( $\vec{R}$ ):

$$\vec{R} = \frac{\sum_i m_i \vec{r}_i}{\sum_i m_i}$$

Если линия действия силы в АТТ проходит через ЦМ, то тело под действием этой силы будет двигаться поступательно.

Главный вектор внешних сил, действующих на механическую систему равен сумме всех внешних сил, действующих на тела системы.

$$\vec{F}_{\text{гл}} = \sum_{i=1}^N \vec{F}_i$$

ЦМ системы движется как МТ масса которой равна массе всей системы и на которую действует сила равная главному вектору внешних сил.

При решении задач по динамике необходимо обратить особое внимание на правильное использование II закона Ньютона.

Сначала необходимо сделать к задаче рисунок, на котором нужно указать СО, расставить все силы, действующие на данное тело, и там, где это требуется, указать направление векторов скорости и ускорения. Затем надо написать II закона Ньютона в векторной форме:

$$\sum_{i=1}^N \vec{F}_i = m\vec{a}$$

где  $\sum_{i=1}^N \vec{F}_i = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_N$ ;  $m$  - масса тела;  $\vec{a}$  - ускорение тела.

Наконец векторное уравнение нужно спроецировать на выбранные направления осей  $X$  и  $Y$ :

$$ma_x = \sum_{i=1}^N F_{ix}, \quad ma_y = \sum_{i=1}^N F_{iy}.$$

и решить полученную систему уравнений относительно неизвестных величин.

Если в движении находится не одно, а несколько связанных между собой тел, то необходимо для каждого тела отдельно выполнить все вышеуказанные действия и решить полученную систему уравнений.

### 1.2.2. Силы в природе

Существует 4 типа взаимодействий, которые называются фундаментальными:

1. гравитационные;
2. электромагнитные;
3. ядерные (сильные);
4. слабые (ответственные за взаимные превращения некоторых элементарных частиц).

В механике изучают силы тяготения (гравитационные), силы упругости, и силы трения (электромагнитные по фундаментальной теории).

### Закон всемирного тяготения

Сформулирован Ньютоном на основе экспериментально установленных Кеплером законов движения планет.

Две МТ притягиваются друг к другу с силами прямо пропорциональными их массам и обратно пропорциональными квадрату расстояния между ними.

$$|\vec{F}_1| = |\vec{F}_2| = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

$\gamma$ - гравитационная постоянная, ее величина определяется выбором системы единиц измерения. (В СИ  $\gamma = 6.67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Нм}^2}{\text{кг}^2}$ ).

В записанной выше форме закон справедлив не только для МТ, но и в следующих двух случаях:

- 1) Тела представляют собой шары со сферически симметричным распределением массы;
- 2) Одно тело МТ, а другое - шар со сферически симметричным распределением массы.

**Сила упругости** - это сила, которая возникает при упругой деформации тела, и которая препятствует дальнейшему изменению форм и размеров этого тела под действием приложенной внешней силы (действует на тело, соприкасающееся с пружиной со стороны пружины).

Закон Гука - при малых (упругих) деформациях возникает сила деформации, пропорциональная величине деформации и направленная в сторону противоположную смещению частиц тела.

$$F_{\text{упр}} = kx$$

$k$  - коэффициент упругости, определяется типом деформации (растяжение, сжатие, сдвиг, изгиб, кручение), свой-

ствами материала, геометрией тела;  $x = |l - l_0|$  – деформация.

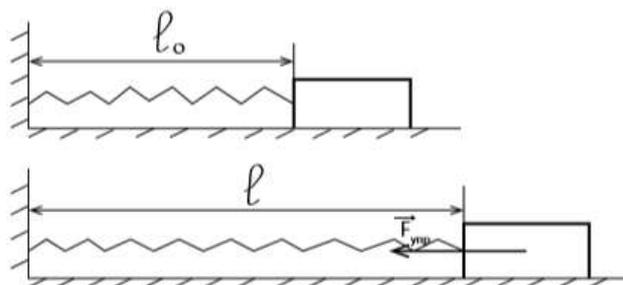


Рис.19. Сила упругости.

#### Силы трения

**Сила трения покоя** - это сила, которая появляется при попытке сдвинуть тело относительно поверхности, с которой оно соприкасается. Сила трения покоя равна по величине и противоположна по направлению сдвигающей силе, т.е. силе, действующей на тело, параллельно поверхности соприкосновения его с другим телом.

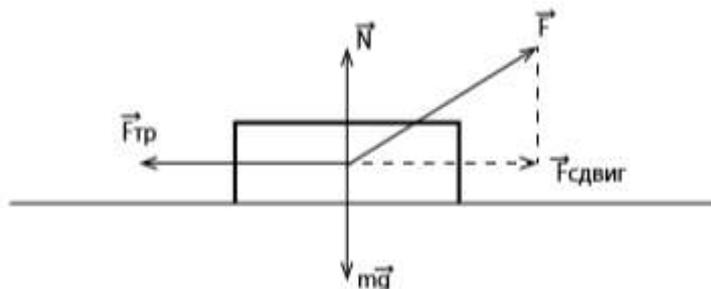


Рис.20. Сила трения

$$|\vec{F}_{\text{тр}}| = |\vec{F}_{\text{сдвиг}}| = F \cos \alpha$$

$$F_{\text{тр, max}} = \mu N$$

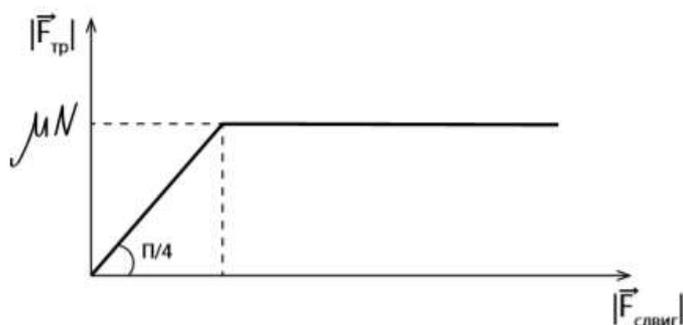


Рис.21. Зависимость модуля силы трения от модуля силы сдвига

**Сила трения скольжения** - возникает, при наличии относительного движения точек тела соприкасающейся с ними поверхности, направлена вдоль поверхности, противоположно скорости этих точек и равна по величине:  $F_{тр,ск} = \mu N$  (только скалярная форма).

$\mu$  - коэффициент трения скольжения, зависит от свойств соприкасающихся поверхностей (рода материала, шероховатостей), а также от относительной скорости точек тела и поверхности. Мы при решении задач будем считать коэффициент трения скольжения равным коэффициенту трения покоя.

**Трение качения.** Сила направлена в сторону, противоположную направлению вращательной скорости точки соприкосновения колеса с поверхностью.

Сила сопротивления движению тела в сплошной среде. Эта сила определяется размерами тела, его формой, свойствами жидкости в которой движется тело (плотность, вязкость), а также зависит от величины относительной скорости тела и окружающей жидкости.

- 1)  $v$  - мала,  $F_c \sim v$  ;
- 2)  $v$  - большая,  $F_c \sim v^2$  .

**Вес** - сила, с которой тело действует на опору или подвес, неподвижные относительно тела и обусловленная инертными свойствами тела или гравитацией.

Вес тела P

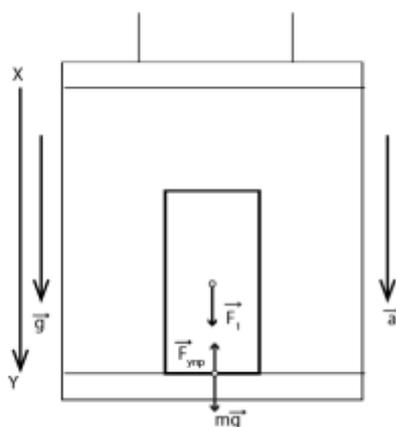


Рис.22. Вес

$$\begin{cases} \vec{P} = -\vec{F}_{\text{упр}} \\ \vec{F}_{\text{упр}} + \vec{F}_T = m\vec{a} \\ \vec{F}_{\text{упр}} = m\vec{a} - \vec{F}_T \\ \vec{P} = \vec{F}_T - m\vec{a} \end{cases}$$

**Невесомостью** называется такое состояние механической системы, в котором действующее на нее гравитационное поле не вызывает давления частиц системы друг на друга и их деформации.

Состояние невесомости возникает в механической системе, если выполняются следующие условия:

- 1) На систему не действуют внешние силы кроме гравитационных;
- 2) Размеры системы таковы, что в ее пределах гравитационное поле можно считать однородным;
- 3) Движение тела поступательно.

### 1.2.3. Движение искусственных спутников планет (ИСП)

Спутники планет движутся под действием лишь только силы гравитации по эллиптическим орбитам.

Мы будем считать, что ИСП движутся по круговым орбитам.

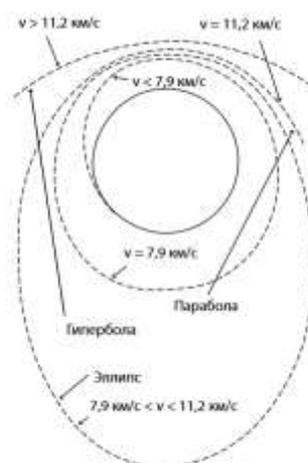


Рис.23. Движение искусственных спутников планет

II Закон Ньютона для ИСП:

$$\gamma \frac{mM}{(R+H)^2} = \frac{mv^2}{R+H}$$

$$v = \sqrt{\frac{\gamma M}{R+H}}$$

Выводы:

1) При заданной высоте полета  $H$  скорость  $V$ , которую должен иметь ИСП не зависит от его массы  $m$ .

2) Из двух ИСП скорость будет меньше у того, который движется на большей высоте.

Первая космическая скорость - это скорость, обладая ко-

торой тело может стать спутником Земли, двигаясь на высоте много меньшей радиуса Земли.

$$R \gg H$$

$$v_1 = \sqrt{\frac{\gamma M}{R}} = \left( \gamma \frac{mM}{R^2} = mg \right) = \sqrt{gR} \approx 8 \cdot 10^3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

### 1.3. ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ

#### 1.3.1. Закон сохранения импульса

Импульс (количество движения)

**Импульс МТ** - это векторная ФВ равная произведению массы тела на ее скорость:  $\vec{p} = m\vec{v}$

**Импульс системы** равен векторной сумме импульсов тел, образующих систему:  $\vec{P}_{\text{сист}} = \sum_i \vec{p}_i$

Импульс системы равен произведению массы системы на скорость движения ее центра масс:  $\vec{P}_{\text{сист}} = (\sum_i m_i) \vec{v}_{\text{цм}}$

Второй закон Ньютона может быть записан теперь в следующем виде (скорость изменения импульса системы, равна силе, приложенной к этой системе):  $\frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} = \vec{F}$

Эта форма второго закона Ньютона является более общей чем приведенная ранее, т.к. допускает изменение импульса не только за счет изменения скорости, но и за счет изменения массы.

#### Закон сохранения импульса (ЗСИ)

Импульс замкнутой системы сохраняется (не изменяется с течением времени).

В рамках классической механики ЗСИ можно рассматривать как следствие закона Ньютона: действительно для замкнутой системы

$$\sum_i \vec{F}_{\text{внеш}} = 0 \Rightarrow \frac{\Delta \vec{P}_{\text{сист}}}{\Delta t} = 0 \Rightarrow \vec{P}_{\text{сист}} = \text{const}$$

Однако ЗСИ оказывается более общим чем закон Ньютона, т.е. он выполняется не только в классической механике, это связано с тем, что ЗСИ связан со свойствами пространства (его однородностью).

Если система не замкнута, то импульс сохраняется в следующих случаях:

1) действующие на систему внешние силы таковы, что их главный вектор равен 0;

2) главный вектор внешних сил, действующих на систему не равен 0, однако равна 0 проекция этого вектора на какую-либо неподвижную ось;

3) в процессе удара, взрыва - при которых импульсы частей системы испытывают большие изменения за малые промежутки времени в связи с появлением в системе кратковременных, но очень больших по величине внутренних сил по сравнению с которыми все действующие на систему внешние силы оказываются малыми.

Импульс тела зависит от выбора СО, изменяясь при переходе от одной СО к другой. Поэтому, составляя уравнения, выражающие ЗСИ, необходимо движение тел в одной и той же инерциальной СО (в НИСО на тела действуют силы инерции, внешние по отношению к данной системе тел. Поэтому всякая система тел в этом случае является неизолированной системой, для которой импульс не сохраняется). В большинстве случаев, решая задачи, пользуются той ИСО, к которой относится условие задачи. Это т.н. "лабораторная" СО, обычно связанная с Землей.

Если в условии задачи фигурирует относительная скорость  $V_{\text{отн}}$  сближения (или удаления) двух движущихся по одной прямой частиц в некоторый момент времени их взаимодействия, то целесообразно рассматривать явление в такой инерциальной системе отсчета, в которой одна из частиц в этот момент неподвижна. Иногда решение задачи упрощается, если выбрать такую СО, которая движется поступательно относительно "лабораторной" со скоростью центра инерции системы частиц и в которой, следовательно, центр инерции неподвижен. Будем для краткости называть такую СО связанной с центром инерции. Этой СО пользуются в тех случаях, когда необходимо рассматривать относительное перемещение частей системы, центр инерции которой движется относительно "лабораторной" СО.

Выведем свойства СО связанной с центром инерции:

$$\text{а) } \vec{v}_c = \overline{const}$$

$$\text{б) } \sum m_i \Delta \vec{r}_i = 0$$

$$\vec{p} = \sum m_i \Delta \vec{v}_i = 0$$

### 1.3.2. Работа. Мощность. Энергия

**Энергия** - это скалярная ФВ которая является общей мерой различных форм движения материи, имеющих место в природе.

При протекании различных процессов энергия может переходить из одного вида в другой или от одного тела к другому.

**Работа (А)** - это скалярная ФВ которая является количественной мерой превращения энергии из одного вида в другой или перехода энергии от одного тела к другому в процессах, сопровождающихся движением макроскопических тел.

**Теплота (Q)** - это скалярная ФВ которая является количественной мерой превращения энергии из одного вида в другой или перехода энергии от одного тела к другому в процессах, происходящих без движения макроскопических тел.

Работа совершается силой.

I. В случае малого перемещения работа А силы F определяется соотношением

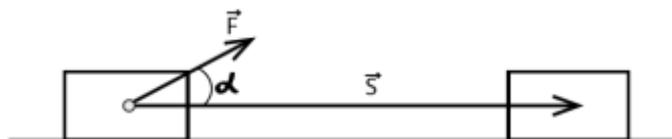


Рис.24. Работа силы

$$A = \vec{F} \vec{S} = FS \cos \alpha - \text{при малом перемещении.}$$

Перемещение считается малым при следующих условиях:

- 1) траектория прямолинейная;
- 2) сила  $F$  постоянна по величине;
- 3) угол  $\alpha$  постоянен по величине.

II. Работа силы, изменяющейся от точки к точке при криволинейной траектории тела, определяется следующим образом:

1) разбиваем траекторию на столь малые участки, что на каждом выполняются условия, написанного ранее соотношения;

2) на каждом участке определяем величины  $F_i, \Delta \vec{r}_i, \alpha$ . Для каждого участка определяем величину работы.

3) Всю работу находим как алгебраическую сумму  $A = \sum_i A_i$ .

В общем случае работа силы зависит от формы траектории.

**Консервативными силами** называются такие силы, работа которых по замкнутому контуру не зависит от формы траектории и определяется лишь начальным и конечным положением тела (гравитационные силы, силы упругости, силы электростатического взаимодействия).

Пространство, в котором действуют консервативные силы называется потенциальным полем. Каждой точке этого поля может быть приписана энергетическая характеристика потенциал (магнитное поле не потенциально).

**Мощность** - скалярная ФВ характеризующая быстроту совершения работы.

1) Средняя мощность - скалярная ФВ которая определяет отношение работы, совершенной за некоторый промежуток времени к величине этого промежутка.

$$N_{\text{ср}} = \frac{A}{\Delta t}$$

2) Мгновенная мощность.

$$N = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{A}{\Delta t} = Fv \cos \alpha$$

где  $\alpha$  - угол между направлением силы и направлением скорости.

Кинетическая энергия - это энергия механического движения тела (хаотическое движение молекул, образующих тело в кинетической энергии не участвуют).

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

Кинетическая энергия системы равна сумме кинетических энергий частей системы.

### Теорема о кинетической энергии

Пусть тело движется прямолинейно с постоянным ускорением, тогда:

$$A = FS = ma \frac{v^2 - v_0^2}{2a} = \frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2}.$$

$$A_{\text{всех}} = \Delta K$$

Если рассмотреть систему МТ, то для каждой из них можно написать предыдущее соотношение, тогда если алгебраически сложить все уравнения, то получается, что изменение кинетической энергии равно алгебраической сумме работ всех внешних и внутренних сил, действующих на систему.

Потенциальная энергия - это часть механической энергии, зависящая от взаимного расположения частей системы и от их положения во внешнем потенциальном поле.

### Потенциальная энергия тела в гравитационном поле

$$\Delta\Pi = A_{\text{гр}}$$

$$\Pi = mgh$$

это соотношение предполагает, что потенциальная энергия обращается в 0 на поверхности Земли; что  $g$  не зависит от  $R$ , т.е.  $h$  много меньше радиуса Земли.

$$A_{m.g} = m\vec{g}\vec{S} = -mg(h_1 - h_2) = -(mgh_1 - mgh_2) = -\Delta\Pi$$

Работа силы тяжести по замкнутому контуру равна нулю.

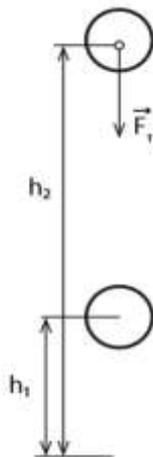


Рис.25. Работа силы тяжести

$$\vec{F} + m\vec{g} = 0$$

В общем случае потенциальная энергия гравитационных сил определяется соотношением:

$$\Pi_{\text{гр}} = -\gamma \frac{Mm}{R+H} + C, (C=0).$$

Это соотношение предполагает, что потенциальная энергия тела обращается в 0, если тело удаляется от поверхности планеты бесконечно далеко.

Потенциальная энергия упруго деформированного тела.

$$\Pi = A_{\text{упр}}$$

$$x = 0 \Rightarrow \Pi = 0$$

$$\Pi = \frac{kx^2}{2}$$

$$A_{\text{упр}} = \langle F_{\text{упр}} \rangle x;$$

$$\left( F_{\text{упр}} \sim x \Rightarrow \langle F_{\text{упр}} \rangle = \frac{F_1 + F_2}{2}; F_1 = kx_1; F_2 = kx_2 \right);$$

$$A_{\text{упр}} = -\left(\frac{kx_2^2}{2} - \frac{kx_1^2}{2}\right)$$

### 1.3.3. Закон сохранения механической энергии (ЗСМЭ)

Механическая энергия замкнутой системы не изменяется с течением времени, если все внутренние силы, действующие в этой системе консервативны (т.е. это могут быть гравитационные силы, силы упругости, но не должно быть сил трения).

$$\begin{aligned} \Delta K_{\text{сист}} &= A_{\text{всех}} = A_{\text{вне}} + A_{\text{вну}} = A_{\text{вне}} + A_{\text{вну}}^{\text{неконс}} + A_{\text{вну}}^{\text{конс}} \\ &= A_{\text{вне}} + A_{\text{вну}}^{\text{неконс}} - \Delta\Pi \\ A_{\text{вне}} + A_{\text{вну}}^{\text{неконс}} &= \Delta K + \Delta\Pi = E_2 - E_1 \\ E &= K + \Pi \\ \Delta E &= A_{\text{вне}} + A_{\text{вну}}^{\text{неконс}} \end{aligned}$$

1)  $\Delta E = 0$ ;  $E_1 = E_2$ ; В замкнутой системе при отсутствии в системе неконсервативных сил, полная механическая энергия системы сохраняется.

2) Если система не замкнутая, но внешние силы работы не совершают и в системе отсутствуют неконсервативные силы, то механическая энергия такой системы сохраняется.

3) В замкнутой системе при наличии в системе неконсервативных сил, механическая энергия системы будет убывать.

### Методические указания

1. В механике применяют закон сохранения энергии главным образом в тех задачах, где между телами образующими замкнутую систему, действуют потенциальные силы (гравитационные и упругие), изменяющиеся во времени. В этих случаях расчет скоростей тел или их координат при помощи второго закона Ньютона приводит к необходимости интегрирования, для выполнения которого необходимо знать закон изменения силы  $F=F(t)$ . Применение ЗСЭ, связывающего

начальное и конечное состояние системы взаимодействующих тел, упрощает решение подобных задач, т.к. позволяет не рассматривать действующие между телами силы.

В задачах на движение тела по окружности в вертикальной плоскости на тело также действуют изменяющиеся во времени силы. При этом наряду с ЗСЭ приходится все же использовать второй закон Ньютона. Однако и в этом случае можно решить задачу, не зная зависимости  $F=F(t)$ .

2. Подчеркнем, что закон сохранения механической энергии можно применять к системе взаимодействующих тел при одновременном выполнении следующих условий: а) система должна быть замкнутой (закон применим и для систем, на которые действуют внешние силы, в том случае, если их суммарная работа равна нулю, т.е.  $A_{\text{вне}} = 0$ ); б) внутри системы должны отсутствовать силы трения (кроме сил трения покоя) и силы неупругих деформаций, т.к. иначе механическая энергия системы будет рассеиваться, превращаясь во внутреннюю энергию.

3. Если тело (или система тел) движется под действием силы тяжести, его нельзя считать изолированным. В этом случае изолированной системой, к которой применим ЗСЭ, будет система тело - Земля. Однако, исключая при этом из рассмотрения энергию Земли, мы практически не совершим ошибки по следующим причинам: а) само понятие потенциальной энергии в поле тяготения Земли предполагает энергию взаимодействия тела и Земли, и уже поэтому характеризует энергию всей системы, а не одного тела; б) изменением кинетической энергии Земли в результате ее взаимодействия с падающим телом можно пренебречь (легко показать, что кинетическая энергия, получаемая телами в результате их взаимодействия, обратно пропорциональна массам тел). Поэтому при решении задач на движение тела (или системы тел) в поле тяготения Земли не рассматривают ни потенциальную, ни кинетическую энергию Земли.

4. Выбор нулевого уровня отсчета высоты  $h$ , входящей в формулу потенциальной энергии поднятого тела, произволен. При изменении нулевого уровня на величину  $\Delta h$  в обеих частях уравнения, выражающего ЗСЭ, появится один и тот же член  $mg\Delta h$  что, разумеется, не повлияет на решение задачи. Обычно за нулевой уровень принимают самое нижнее положение движущегося тела.

Если потенциальная энергия какого-либо тела системы не изменяется, то, составляя уравнение, выражающее ЗСЭ для системы, эту энергию вообще можно не рассматривать.

**Вторая космическая скорость.** - это скорость, обладая которой на поверхности Земли тело может удалиться, бесконечно далеко двигаясь по инерции (под действием только лишь гравитационного поля Земли).

Величина второй космической скорости может быть найдена из ЗСМЭ из системы Земля-тело.

$$\begin{aligned} v_{\infty} &= 0; K_2 = 0; \Pi_2 = 0; \\ K_1 + \Pi_1 &= K_2 + \Pi_2 \\ \frac{mv_{II}^2}{2} - \gamma \frac{Mm}{R} &= 0 + 0 \\ v_{II} &= \sqrt{\frac{2\gamma M}{R}} = \sqrt{2gR} = 11,2 \cdot 10^3 \frac{м}{с} \end{aligned}$$

#### 1.3.4. Столкновение тел

**Удар** - такое столкновение тел при котором за очень малый промежуток времени скорости тел значительно изменяются.

Мы будем рассматривать столкновение шаров. В этом случае различаются центральный и нецентральный удар.

Удар двух шаров называется центральным (лобовым) если их скорости направлены вдоль прямых, соединяющих центры шаров. После центрального удара скорость каждого из шаров либо сохраняет свое направление, либо изменяет его на противоположное.

Если удар не центральный, то угол разлета шаров может меняться произвольным образом при изменении начальных условий.

Удар называется **абсолютно упругим**, если механическая энергия сталкивающихся тел при ударе не изменяется, для расчета такого удара необходимо записывать уравнения, выражающие закон сохранения импульса и закон сохранения механической энергии.

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

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} = \frac{m_1 u_1^2}{2} + \frac{m_2 u_2^2}{2}$$

**Абсолютно неупругий удар** - это удар после которого тела приобретают одинаковую скорость: модули равны и направления совпадают.

Для расчета такого удара необходимо записывать уравнения выражающие ЗСИ и ЗСМЭ (механическая энергия при таком ударе не сохраняется, часть ее обязательно должна уйти в немеханические виды).

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = (m_1 + m_2) \vec{u}$$

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} = \frac{(m_1 + m_2) u^2}{2} + Q$$

Q - это та часть механической энергии, которая при ударе преобразуется в немеханические виды.

## 1.4. СТАТИКА

1.4.1. Равновесие материальной точки (МТ)  
и абсолютно твердого тела (АТТ)

Это раздел механики, в котором изучают условия равновесия тел и механических систем.

МТ считается находящейся в равновесии, если она покоится или движется равномерно и прямолинейно.

Механическая система считается находящейся в равновесии, если в равновесии находятся все ее части и отсутствует относительное движение частей системы.

Виды равновесия:

1) **Устойчивое равновесие** - оно соответствует минимуму потенциальной энергии системы (при малых отклонениях от состояния равновесия система возвращается в состояние равновесия).

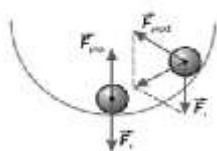


Рис.26. Устойчивое равновесие

2) **Неустойчивое равновесие** соответствует максимуму потенциальной энергии системы (при малых отклонениях от состояния равновесия, равновесие нарушается еще сильнее).

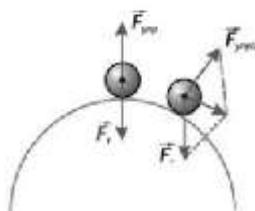


Рис.27. Неустойчивое равновесие

3) **Безразличное** - потенциальная энергия системы не изменяется при изменении ее состояния.

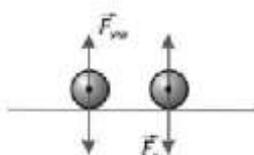


Рис.28. Безразличное равновесие

Из состояния равновесия система может быть выведена только лишь в результате внешнего воздействия, т.е. в результате действия силы.

Если на АТТ находящееся в равновесии начнет действовать сила, то тело начнет двигаться, причем его движение можно рассматривать как сумму поступательного и вращательного движения. Вращающее действие силы описывается ФВ которая называется момент силы относительно оси или относительно точки.

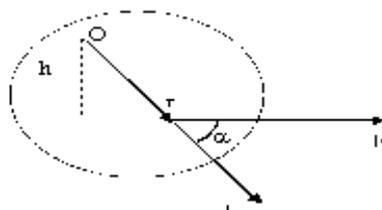


Рис.29

$$|\vec{M}| = Fh = Fr \sin \alpha$$

Направление вектора  $\vec{M}$  перпендикулярно плоскости, в которой располагаются векторы  $\vec{F}$  и  $\vec{r}$ . Причем с конца вектора  $\vec{F}$  вращение от  $\vec{r}$  к  $\vec{F}$  (по кратчайшему направлению) должно казаться происходящим против часовой стрелки.

Пара сил - это две равные по модулю, направленные противоположно силы, линии действия которых не совпадают.

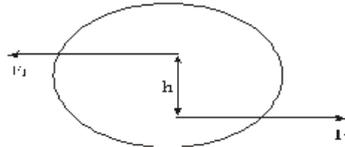


Рис.30

$$|\vec{F}_1| = |\vec{F}_2| = F$$

$h$  - плечо пары. Момент пары  $|\vec{M}| = Fh$  одинаков для всех точек плоскости в которых лежат силы образующие пару.

**Условие равновесия МТ.**

$$\sum_i \vec{F}_i = 0$$



Рис.31. Равновесие МТ

**Условия равновесия АТТ**

- 1)  $\sum_i \vec{F}_i = 0$
- 2)  $\sum_i \vec{M}(\vec{F}_i) = 0$  (относительно любой точки).

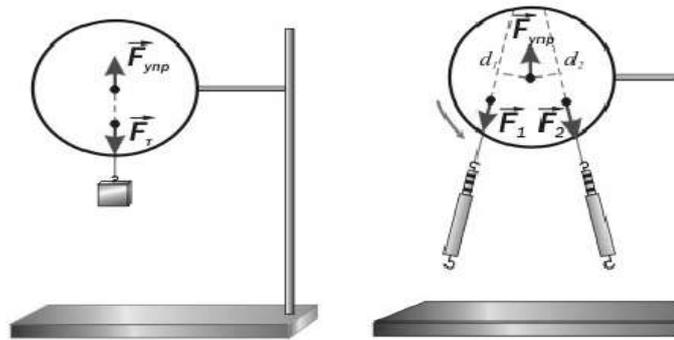


Рис.32.

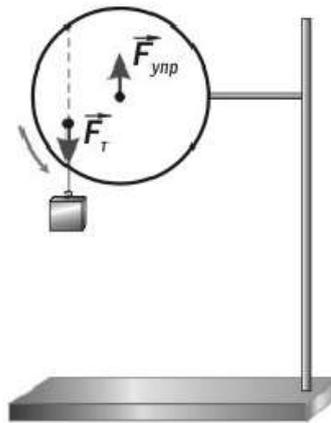


Рис.33. Равновесие АТТ

**Центр тяжести тела или системы (ЦТ)** - это точка относительно которой момент силы тяжести, действующий на тело или системы равен нулю (эта точка может находиться вне тела). ЦТ совпадает с центром массы лишь в том случае, когда поле тяжести однородно.

## 1.4.2. Гидростатика

Это раздел механики, изучающий условия равновесия жидкости или газа.

Важнейшим понятием гидростатики является давление.

**Давление** - это скалярная ФВ которая характеризует состояние жидкости или газа, и которая определяется соотношением:

$$P = \frac{F_{\perp}}{S}$$

$F_{\perp}$  - сила, действующая по нормали к поверхности,  $S$  - площадь поверхности (по записанному соотношению предполагаем, что сила давления равномерно распределена по поверхности).

Силы, действующие на жидкость или газ, условно делят на две группы:

1) поверхностные силы - это силы распределенные по поверхности жидкости (атмосферное давление на поверхности жидкости);

2) силы распределенные по объему жидкости (сила тяжести).

**Поверхностное давление** - это давление, обусловленное действием поверхностных сил (не путать поверхностное давление с капиллярным давлением).

**Закон Паскаля** - поверхностное давление, действующее на жидкость или газ, заключенные в замкнутом сосуде передается этой жидкостью или газом во все точки сосуда без изменения.

**Гидростатическое давление** - это давление, обусловленное весом жидкости или газа.

$$P_{ГС} = \rho gh$$

Единицы давления.

$$[P] = \frac{[F]}{[l]^2}$$

$$\text{СИ: } 1 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = 1 \text{Па};$$

1 атм  $\approx 10^5$  Па;  
1 мм.рт.ст. = 133 Па;  
1 м.воды =  $10^4$  Па.

### Сила Архимеда

На тело, погруженное в жидкость (или газ) действует сила, направленная вертикально вверх, равная по величине весу жидкости (или газа) объем которой равен объему погруженной части тела. Сила Архимеда представляет собой равнодействующую сил давления, действующих на поверхности тела со стороны окружающей его жидкости (или газов).

$$F_a = \rho_{ж} g V_{погр}$$

## 2. ТЕРМОДИНАМИКА

### 2.1. ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКИ

#### 2.1.1. Основные положения молекулярно-кинетической теории

В науке сложилось два метода исследования свойств вещества и физических явлений связанных с изменением свойств макроскопических тел:

- 1) молекулярно-кинетический;
- 2) термодинамический.

Молекулярная физика исходит из следующих положений.

I. Любое вещество - твердое, жидкое, газообразное состоит из обособленных частиц - молекул, атомов или ионов.

II. Частицы всякого вещества находятся в беспорядочном хаотическом движении, не имеющем какого-либо преимущественного направления. Это движение называют тепловым, т.к. его интенсивность определяется температурой вещества.

Характер теплового движения:

1) В твердых телах молекулы совершают колебания около положения равновесия. С ростом температуры увеличивается амплитуда колебаний и возрастает среднее расстояние между молекулами.

2) В жидкостях большая часть молекул совершает колебания около положения равновесия, однако имеется некоторая доля молекул, которая обладает энергией достаточной, чтобы покинуть положение равновесия и сместиться на расстояние равное нескольким диаметрам молекул. Наличие таких молекул обуславливает текучесть жидкости, с ростом температуры доля их увеличивается и текучесть возрастает.

III. Частицы вещества взаимодействуют друг с другом.

Некоторым доказательством основных положений МКТ является Броуновское движение. Сущность этого явления заключается в том, что очень мелкие (но макроскопические) частицы вещества, взвешенные в жидкости или газе, совершают хаотическое движение. Интенсивность этого движения

определяется температурой (растет с увеличением  $T$ ) и величиной частиц (растет с уменьшением размеров). Броуновская частица движется под воздействием ударов хаотически движущихся молекул окружающей жидкости или газа, в каждый момент суммарный импульс, сообщенный Броуновской частице отличен от нуля, т.к. с разных сторон частица испытывает разное число ударов и скорости молекул не одинаковы. В следующий момент времени импульс изменится и в результате Броуновская частица движется хаотически, участвуя в тепловом движении.

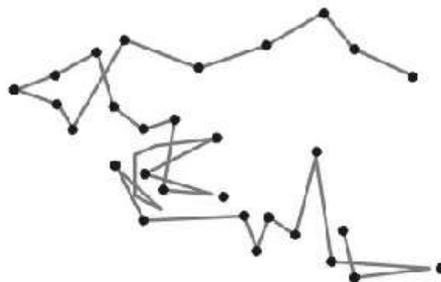


Рис.34. Броуновское движение

### 2.1.2. Основные понятия молекулярной физики

1) Молекулярная масса ( $M$ ) - это безразмерная ФВ равная отношению массы молекулы данного вещества к  $1/12$  массы атома углерода  $C^{12}$ ,

$$M = \frac{m_1}{\frac{1}{12} m_{C^{12}}}$$

2) Количество вещества ( $\nu$ ) - это ФВ, определяемая числом структурных единиц (молекул, атомов или ионов) из которых состоит тело. Единицей количества вещества является моль. 1 моль любого вещества содержит одинаковое число

структурных элементов (молекул) называемое числом Авогадро ( $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$  частиц/моль),

$$v = \frac{N}{N_A}$$

3) Молярная масса ( $\mu$ ) выражается в граммах/моль, численно равна молекулярной массе вещества,

$$\mu = m_0 N_A$$

$m_0$  масса молекулы ( $m_0 = \frac{\mu}{N_A}$ );

### Взаимодействие между молекулами

Силы взаимодействия между молекулами по фундаментальной теории являются электромагнитными. Условно эти силы разделяются на силы притяжения и силы отталкивания. Силы отталкивания принято считать положительными, а силы притяжения отрицательными. Межмолекулярные силы являются короткодействующими, т.к. они быстро убывают с ростом расстояния между молекулами:  $F \sim \frac{1}{r^7}$  ( $r$  - расстояние между молекулами)

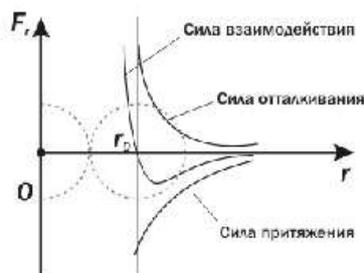


Рис.35. Силы взаимодействия между молекулами

Расстояние  $r_0$  (соответствующее нулю функции) определяет устойчивое равновесие взаимодействующих молекул. Функция зависимости энергии взаимодействия молекул от

расстояния между ними будет выглядеть аналогичным образом, она имеет четко выраженный минимум  $P_0$  при  $r = r_0$ . В зависимости от соотношения средней кинетической энергии молекулы и  $|P_0|$ , различают три агрегатные состояния вещества: твердое, жидкое, газообразное.

$K \ll |P_0|$  - твердое;

$K \leq |P_0|$  - жидкое;

$K > |P_0|$  - газообразное.

## 2.2. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

### 2.2.1. Идеальный газ

В термодинамике, в отличие от молекулярной физики не принимают в рассмотрение микроструктуру вещества. Любое вещество рассматривается, как сплошная среда. При анализе процессов термодинамика исходит из небольшого числа основных законов, называемых началами термодинамики, которые являются обобщением экспериментальных данных.

**Термодинамические системы (ТДС)** - это совокупность рассматриваемых конкретных заданных макроскопических тел, для которых не существенны:

- 1) движение как целое;
- 2) положение во внешних силовых полях.

те тела, которые не включены в ТДС, но могут влиять на ее состояние называются окружающей средой.

**Параметры состояния** - это ФВ характеризующие состояние системы. Простейшая ТДС характеризуется следующими основными параметрам:

- 1) давление ( $p$ );
- 2) объем ( $V$ );
- 3) температура ( $T$ );
- 4) род вещества ( $\mu$ );
- 5) масса вещества ( $m$ ).

Можно ввести параметры, которые можно выразить через пять основных параметров состояния:

Количество вещества  $\nu = \frac{m}{\mu}$ ;

плотность вещества  $\rho = \frac{m}{V}$  и т.д.

Состояние системы называется стационарным, если при неизменных внешних условиях любой параметр в любой точке системы не изменяется с течением времени.

Стационарное состояние будет равновесным, если в системе отсутствуют процессы переноса энергии, импульса, вещества.

В простейшей ТДС в равновесном состоянии, каждый параметр в любой точке имеет одно и тоже значение.

**Процесс** - это изменение состояния системы.

Процесс связан с нарушением равновесия, однако если процесс протекает очень медленно, то нарушение системы незаметное.

**Равновесный процесс** - это бесконечно медленный процесс, его можно рассматривать, как непрерывную последовательность равновесных состояний.

Равновесные состояния и равновесные процессы могут быть изображены графически на диаграммных осях (P,V), (P,T), (V,T).

**Внутренняя энергия** (термодинамической системы) - это та энергия которой обладает система, если из ее полной энергии вычесть кинетическую, как целое и потенциальную во внешних силовых полях.

С позиции МКТ внутренняя энергия представляет собой сумму кинетической энергии хаотического движения молекул (ХДМ), потенциальной энергии взаимодействия молекул друг с другом и внутримолекулярной энергии.

Внутренняя энергия представляет собой функцию состояния системы, это означает что всякий раз, когда система переходит в некоторое замкнутое состояние, внутренняя энергия принимает одно и тоже присущее этому состоянию значение, не зависящее от предыстории системы.

Внутренняя энергия может быть изменена двумя способами:

- 1) Путем совершения над системой работы;
- 2) Путем теплопередачи.

Температура является особым параметром среди основных параметров состояний.

Температура - является количественной мерой внутренней энергии, т.к. связана с тепловым движением молекул. Кроме того, температура является основным критерием равновесия ТДС.

#### Нулевое начало Термодинамики

Если ТДС находится в равновесии, то все ее части должны находиться при одной и той же температуре (любой другой параметр в разных частях системы имеет различные значения).

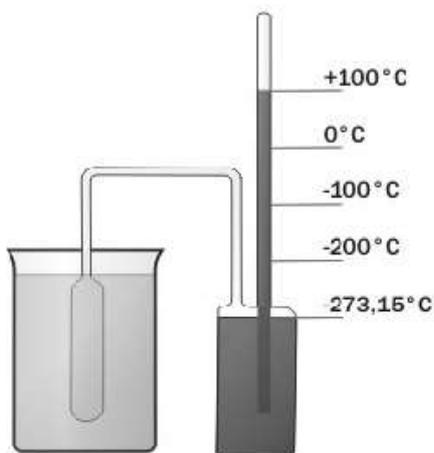


Рис.35. Термометр

Для измерения температуры используют зависимость от температуры различных свойств: плотности, давления, электрического сопротивления и т.д.

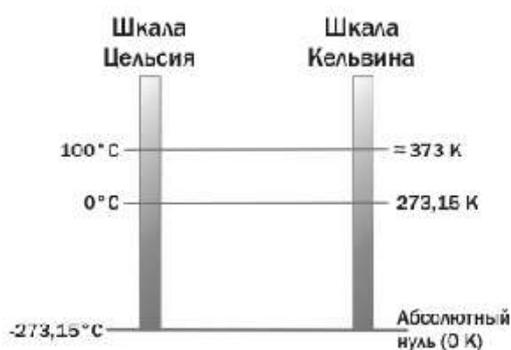


Рис.36. Шкалы температур

**Уравнение состояния** - это уравнение, которое связывает основные параметры состояния.

Для разреженных газов уравнения состояния называют уравнениями Менделеева-Клайперона:

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

$$R = 8,3 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$$

Это уравнения являются обобщением частных газовых законов, установленных экспериментально.

#### Газовые законы

При экспериментальном изучении свойств газов обычно поступают так: позволяют изменяться лишь двум параметрам, поддерживая остальные неизменными.

**Закон Бойля-Мариотта:** при  $\frac{m}{\mu} = const; T = const$ .

$$p \sim \frac{1}{V} \Rightarrow pV = const$$

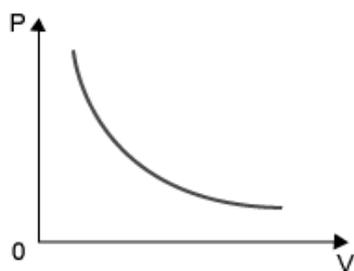


Рис.36. Изотерма

**Закон Гей-Люссака:** при  $\frac{m}{\mu} = const; p = const$   
 $V = V_0(1 + \alpha t)$

где  $\alpha$  - коэффициент теплового расширения,  $t$  - температура в  $100^\circ$  шкале.

$$\text{Или } \frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

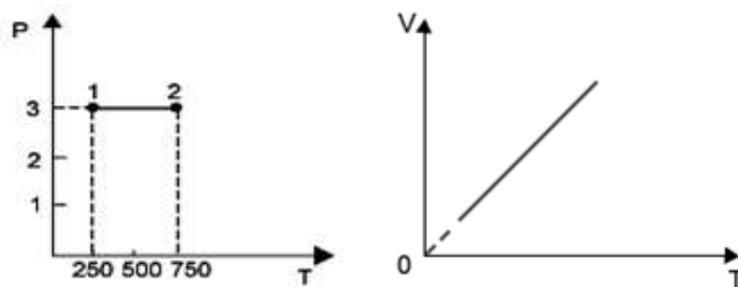


Рис.37. Изобара

**Закон Шарля:** при  $\frac{m}{\mu} = const; V = const$   
 $p = p_0(1 + \beta t)$

где  $\beta$  - коэффициент теплового расширения,  $t$  - температуру в  $100^\circ$  шкале.

$$\text{Или } \frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

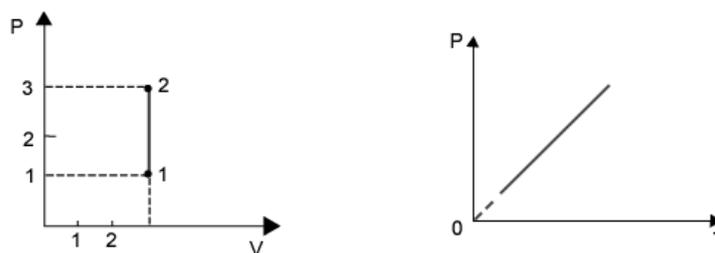


Рис.38. Изохора

**Закон Дальтона:** Давление смеси газов равно сумме парциальных давлений газов, образующих смеси.

**Парциальное давление** - это давление при котором находился бы один из газов, входящих в состав смеси, если бы он занимал такой же объем, что и смесь и находился при той же температуре.

Все перечисленные законы выполняются лишь в том случае, если газ является достаточно разреженным.

#### Идеальный газ

С позиции термодинамики - это газ, свойства которого описываются уравнением Менделеева-Клайперона.

С позиции МКТ - это газ, для которого выполняется следующее условие: молекулы не взаимодействуют друг с другом на расстоянии (т.е. не притягиваются и при непосредственном соприкосновении отталкиваются).

Расчет давления идеального газа (упрощенное предположение).

1) Все молекулы одинаковы и имеют массу  $m$ .

2) Скорости всех молекул одинаковы по модулю.

Могут долететь до стенки площадью  $S$  в течение малого интервала времени  $\Delta t$  только те молекулы, которые в начальный момент находятся в цилиндре объемом:

$$V = |v_x| \Delta t S$$

где  $|V_x|$  - модуль проекции скорости молекулы на ось  $x$  совпадающую по направлению с нормалью к стенке. Количество ударов о стенку будет равно:

$$Z = \frac{n}{2} |v_x| \Delta t S,$$

где  $n$  - концентрация молекул; т.к. только половина молекул имеет положительную проекцию скорости на ось  $x$ .

Через время  $\Delta t$  импульс поршня изменится на:

$$\Delta p = F \Delta t = 2m_0 |V_x| Z = nm_0 S v_{x, \text{ср.кв.}}^2 \Delta t$$

Т.к. скорости молекул не одинаковы, то берем среднюю квадратичную скорость, а так как считаем, что скорости равномерно распределены по всем направлениям, то  $v_{x, \text{ср.кв.}}^2 = \frac{1}{3} v_{\text{ср.кв.}}^2$ , и т.о. получаем, что давление равно:

$$P = \frac{F}{\Delta t S} = \frac{1}{3} nm_0 v_{\text{ср.кв.}}^2$$

или

$$P = \frac{2}{3} n E_{\text{ср}}$$

Далее запишем уравнение Менделеева-Клайперона:

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

При этом учтем:

$$nV = N = N_A \frac{m}{\mu},$$

$$V = \frac{N_A m}{n \mu},$$

где  $N_A$  - число Авогадро, а  $\frac{R}{N_A} = k$  - постоянная Больцмана, тогда получаем:

$$P = nkT.$$

Это основное уравнение состояния идеального газа.

### Внутренняя энергия идеального газа

Внутренняя энергия любой термодинамической системы состоит из трех компонентов:

$$U = K_{\text{хдм}} + \Pi_{\text{ммв}} + W_{\text{вмв}}$$

$K_{\text{хдм}}$  - кинетическая энергия хаотического движения молекул,  $\Pi_{\text{ммв}}$  - потенциальная энергия межмолекулярного взаимодействия, для идеального газа  $\Pi_{\text{ммв}} = 0$ ,  $W_{\text{вмв}}$  - внутримолекулярная энергия ( $W_{\text{вмв}} = 0$ ).

Если молекулы газа одноатомны, то средняя кинетическая энергия хаотического движения для одной молекулы равна

$$K_{\text{хдм}} = \frac{3}{2} kT$$

Энергия системы равна сумме кинетических энергий всех молекул:

$$U = E_{\text{ср}} N = \frac{3}{2} kT \frac{m}{\mu} N_A = \frac{3}{2} \frac{m}{\mu} RT$$

$N$ -число всех молекул

Если молекулы являются двухатомными, то кроме поступательного движения такая молекула участвует во вращательном движении относительно двух координатных осей, не совпадающих с продольной осью молекулы.

Закон равномерного распределения энергий по степеням свободы:

**Число степеней свободы** - это количество независимых величин, полностью определяющих положение механической системы в пространстве.

На каждую степень свободы приходится энергия равная

$$E_{1\text{ср}} = \frac{1}{2} kT$$

Для МТ число степеней свободы равно 3, т.к. ее положение в пространстве определяется тремя координатами.  $E_{\text{ср}} = \frac{3}{2}kT$  ( $E_{\text{ср}} = K_{\text{хдм}}$ ).

Для 2-х атомной молекулы с жесткой связью - 5 - 3 координаты и два угла поворота.  $E_{\text{ср}} = \frac{5}{2}kT$

При высокой температуре атомы входящие в состав молекулы начинают колебаться друг относительно друга, т.е. появляется колебательная степень свободы. С колебательной степенью свободы связана энергия  $E_{\text{ср}} = \frac{7}{2}kT$

В общем случае внутренняя энергия идеального газа выражается соотношением:

$$U = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} RT$$

#### Работа и теплота термодинамических процессов

Внутренняя энергия ТДС может быть изменена двумя способами:

- 1) Путем совершения работы над системой;
- 2) Изменением теплоты системы.

$$\Delta U = Q + A_{\text{внеш}}$$

$$A_{\text{внеш}} = -A_{\text{сист}}$$

#### I Начало Термодинамики (ЗСЭ для ТДС):

$$Q = \Delta U + A_{\text{сист}}$$

Теплота, подведенная к системе, расходуется на приращение внутренней энергии системы и на совершение системой работы.

Все величины, входящие в это соотношение, являются алгебраическими, т.е. могут принимать как положительные, так и отрицательные значения:

$Q > 0$  - теплота подводится к системе;

- $Q < 0$  - теплота отводится от системы;
- $\Delta U > 0$  - внутренняя энергия системы растет;
- $\Delta U < 0$  - внутренняя энергия системы уменьшается;
- $A_{\text{сист}} > 0$  - система совершает работы, объем системы увеличивается;
- $A_{\text{сист}} < 0$  - над системой совершается работа, объем системы уменьшается.

### Работа идеального газа

Рассмотрим пример на вычисление работы системы при изменении объема в изобарическом процессе:  $A = p\Delta V$  ( $p = \text{const}$ ). при  $p = \text{const}$ ,  
Изобарный процесс:

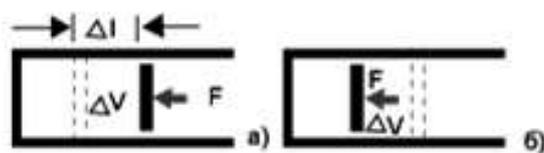


Рис.39

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

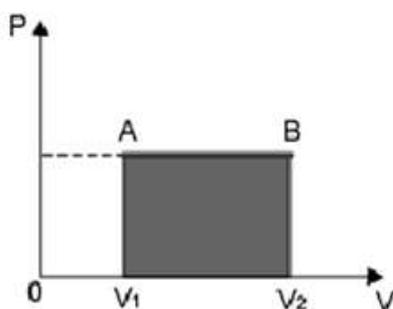


Рис.40. Графическая интерпретация работы при изобарическом процессе

### Работа при изобарическом процессе

Из рисунка видно, что графической интерпретацией работы идеального газа при изобарическом процессе является площадь под графиком на диаграмме (P,V).

Для расчета работы идеального газа при произвольном процессе разобьем процесс перехода из состояния 1 в состояние 2 последовательностью изобарических процессов с очень маленьким изменением объема в каждом. Нетрудно видеть, что в общем случае работа ТДС также равна площади фигуры ограниченной процессом на диаграмме (P,V).

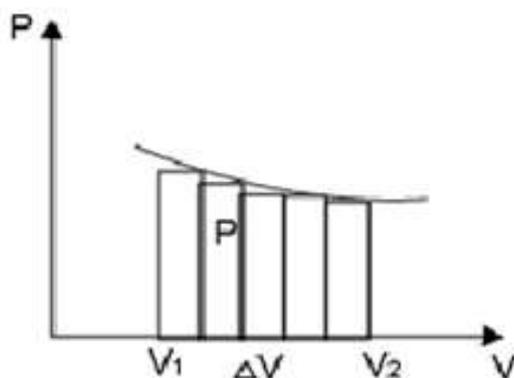


Рис.41. Графическая интерпретация работы при произвольном процессе

Изотермический процесс:  $\Delta u = 0$  При изотермическом расширении необходимо подводить тепло к системе, а при сжатии - отводить (температура не меняется).

$$Q = A$$

Адиабатный процесс (процесс без теплообмена с окружающей средой):

$$Q = 0$$

$$0 = \Delta u + A$$

$$\Delta u = -A$$

Адиабатное расширение приводит к уменьшению внутренней энергии и температуры системы, адиабатное сжатие к увеличению внутренней энергии и температуры системы. На диаграмме (P,V) график адиабаты идет круче чем изотерма. Любой быстрый процесс - адиабатический.



Рис.42

### Теплоемкость

1) **Теплоемкость системы** - это скалярная ФВ численно равная тому количеству теплоты, которое необходимо сообщить системе, чтобы ее температура изменилась на 1 кельвин.

$$C_{\text{сист}} = \frac{Q}{\Delta T} = \frac{\Delta u}{\Delta T} + \frac{A}{\Delta T} \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{К}} \right]$$

Теплоемкость характеризует не только плотность вещества, но и процесс, при котором происходит теплообмен.

2) **Удельная теплоемкость** -теплоемкость единицы массы вещества.

$$c = \frac{C_{\text{сист}}}{m} = \frac{Q}{m\Delta T}$$

3) **Молярная теплоемкость** - теплоемкость одного моля вещества.

$$C_{\mu} = \frac{\mu Q}{m\Delta T}$$

Вычислим молярную теплоемкость  $C_\mu$  для некоторых процессов ( $\frac{m}{\mu} = 1$ ):

1)  $T = \text{const}$  (изотермический)  $\Delta T = 0$ ;  $A = Q$

$$C_T = \frac{Q}{\Delta T} = \infty$$

2)  $Q = 0$  (адиабатный)  $\Delta T \neq 0$

$$C_Q = \frac{Q}{\Delta T} = 0$$

3)  $V = \text{const}$  (изохорический)  $\Delta V = 0 \Rightarrow A = 0$

$$C_V = \frac{\Delta u}{\Delta T}$$

4)  $p = \text{const}$  (изобарический)

$$C_p = \frac{\Delta u}{\Delta T} + R = C_V + R = \frac{i}{2}R + R = \frac{i+2}{2}R$$

$[R] = \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$  - это работа, которую совершает 1 моль идеального газа при изменении температуры на 1К при постоянном давлении (из  $C_p = \frac{\Delta u}{\Delta T} + R$ ).

Понятие об отрицательной теплоемкости

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

Отрицательная теплоемкость характеризует такие процессы, в которых подведение теплоты в систему не компенсирует энергетические затраты на совершение работы.

$$Q = \Delta u + A \Rightarrow \Delta u < 0 \Rightarrow \Delta T < 0 \Rightarrow C < 0$$

На диаграмме  $(p, V)$  процессы с отрицательной теплоемкостью изображаются линиями, лежащими между изотермой и адиабатой.

**Обратимым** называется такой процесс, при котором за счет бесконечно малого изменения внешних условий система может пройти ту же последовательность состояний в обратном порядке.

Равновесные процессы будут обратимыми, если в системе нет сил трения.

Реальные процессы, происходящие в ТДС оказываются необратимыми. Например, при соприкосновении горячего тела с холодным теплота переходит от горячего к холодному, обратный процесс оказывается невозможным (если система изолирована) хотя он и не противоречит ЗСЭ. Это указывает, что I начало ТД оказывается недостаточным для описания термодинамических процессов.

II начало термодинамики выражает необратимость процессов, происходящих в реальных системах, и позволяет ввести количественную меру необратимости энтропию.

**Формулировка Кельвина:**

Невозможен процесс, единственным конечным результатом которого была бы механическая работа, совершаемая за счет охлаждения теплового резервуара, имеющего всюду одинаковую температуру.

**Формулировка Клаузиуса:**

Невозможен процесс, единственным количественным результатом которого был бы переход теплоты от тела, менее нагретого к телу более нагретому.

II начало термодинамики справедливо только для макроскопических тел.

**Тепловой двигатель** - это устройство позволяющее преобразовывать тепловую энергию в механическую; в соответствии со II началом термодинамики любой тепловой двигатель должен иметь нагреватель и холодильник, кроме того необходимо иметь еще одно тело - газ или пар (рабочее тело)

которое соприкасаясь с нагревателем получает от него теплоту  $Q_1$  и расширяясь совершает работу  $A$ . Затем соприкасаясь с холодильником рабочее тело отдает ему теплоту  $Q_2$  и сжимаясь при более низкой температуре возвращается в исходное состояние.

Процесс, у которого конечное состояние совпадает с начальным называется круговым процессом или циклом.

На диаграмме  $(p, V)$  работа цикла пропорциональна площади ограниченной кривыми процессов входящих в цикл.

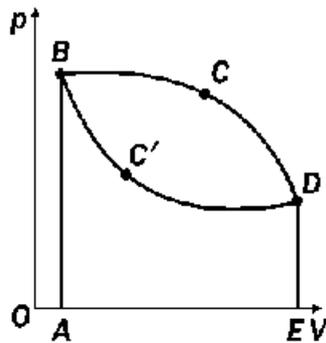


Рис.42. Циклический процесс

Найдем КПД кругового процесса, для этого напишем I начало термодинамики:

$$Q = \Delta U + A, \Delta U = 0$$

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

**Цикл Карно** - это круговой процесс, который состоит из четырех обратимых процессов двух изотерм и двух адиабат. Для кругового процесса  $\eta$  не зависит от свойств рабочего тела.

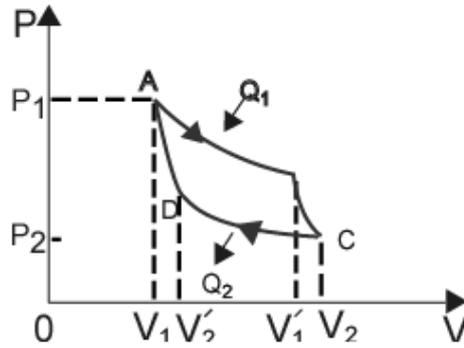


Рис.43. Цикл Карно

Теорема Карно:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

### 2.2.2 Реальные газы.

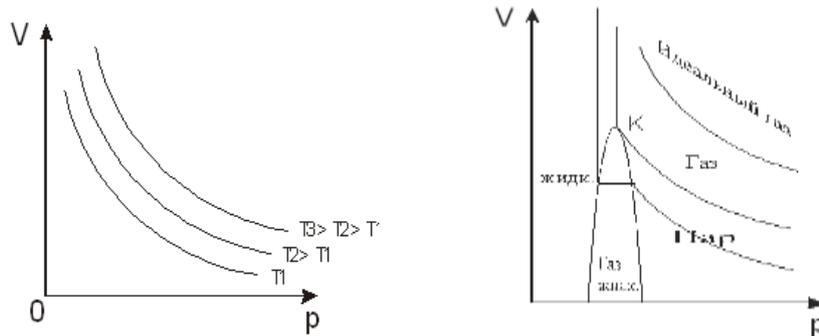


Рис.44. Изотермы слева ИГ, справа реального газа

Модель идеального газа предполагает, что молекулы не взаимодействуют друг с другом на расстоянии, это допущение хорошо выполняется при малой плотности и высокой температуре газа, однако, если плотность газа велика, а температура достаточно низкая, то взаимодействие между молекулами приводит к тому, что свойства реального газа существенно отличаются от свойств идеального газа.

$K$  - критическая точка;

$T_k$  - критическая температура.

Изотерма реального газа отличается от изотермы идеального газа наличием горизонтального участка. Горизонтальный участок соответствует таким состояниям, когда вещество существует одновременно и в жидком, и в газообразном состоянии. В этом случае уменьшение объема не приводит к росту давления, потому что одновременно часть газа превращается в жидкость. Процесс превращения газа в жидкость называется конденсацией. Левая граница горизонтального участка соответствует состоянию, когда все вещество находится в виде жидкости. Т.к. жидкость практически несжимаема, то попытка уменьшить объем приведет к бесконечно высокому давлению.

Изотерма, соответствующая более высокой температуре, имеет более короткий горизонтальный участок: правая граница его сдвигается влево, т.к. конденсация начинается при больших плотностях, а левая граница сдвигается вправо, т.к. жидкость при нагревании расширяется.

Температура, при которой горизонтальный участок обращается в точку, называется критической температурой (это характеристика вещества).

**Критическое состояние вещества** - это состояние, при котором жидкость и ее насыщенный пар становятся неразличимы по своим свойствам.

Характеристики вещества:  $P_{кр}$ ;  $T_{кр}$ ;  $\rho_{кр}$

Газообразное состояние вещества при температуре мень-

шей, чем критическая, называется паром. Пар можно путем изотермического сжатия превращается в жидкость. Если температура вещества больше критической, то путем изотермического сжатия превратить газ в жидкость невозможно.

**Испарение** - это процесс превращения жидкости в газообразное состояние, происходит при любой температуре.

Процесс испарения происходит без теплообмена с окружающей средой, приводит к понижению температуры жидкости.

Процесс испарения происходит при постоянной температуре, требует подведения теплоты.

$$Q=m\lambda$$

где  $\lambda$  - удельная теплота парообразования, она численно равна количеству теплоты, которое необходимо сообщить жидкости, чтобы при неизменной температуре обратить ее в пар. Величина  $L$  является характеристикой вещества и зависит от температуры, при которой происходит испарение.

Если обратный процесс - конденсация, происходит при постоянной температуре, то в этом случае теплоту нужно отводить от системы. Удельная теплота конденсации совпадает с удельной теплотой парообразования по модулю.

**Насыщенный пар** - это пар, находящийся в состоянии динамического равновесия со своей жидкостью.

**Свойства насыщенного пара:**

Давление и плотность насыщенного пара не зависят от занимаемого объема и для каждого вещества определяется лишь температурой.

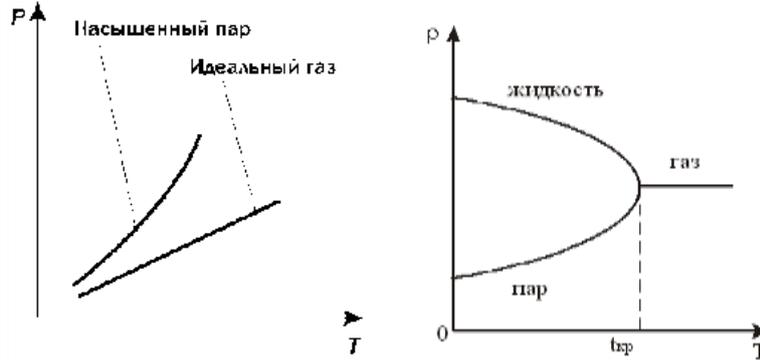


Рис.45

**Кипение** - это парообразование, происходящее не только со свободной поверхности жидкости, но и в ее толще.

Жидкость кипит при такой температуре, при которой давление насыщенного пара превосходит давление жидкости.

#### Уравнение Ван-дер-Ваальса

Это уравнение описывает свойства реального газа (не очень точное, но простое).

$$(p - \Delta p_0)(V - \Delta V_0) = RT$$

$\Delta V_0$  - объем молекул,  $\Delta p_0$  - давление, обусловленное межмолекулярным взаимодействием.

Влажность воздуха.

**Абсолютная влажность** ( $\rho$ ) - это плотность водяных паров, находящихся в воздухе.

$$\rho = \frac{m_{\text{вод.пар.}}}{V}$$

**Относительная влажность** (f)

$$f = \frac{p_{\text{пар}}(t)}{p_{\text{нас}}(t)} = \frac{\rho_{\text{пар}}(t)}{\rho_{\text{нас}}(t)} = \frac{m_{\text{пар}}(t)}{m_{\text{нас}}(t)}$$

Параметры насыщенного пара воды ( $\rho; p$ ) при различных значениях температуры определены экспериментально и результаты измерений занесены в таблицы.

Физические свойства ненасыщенного пара воды с хорошей точностью описываются уравнением Менделеева-Клапейрона.

### 2.2.3 Свойства жидкостей

В жидкостях молекулы располагаются на малых расстояниях друг от друга, поэтому силы межмолекулярного взаимодействия оказываются значительными по величине и во многом определяют свойства жидкостей.

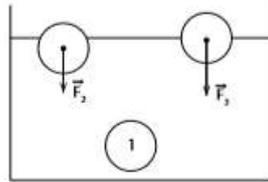


Рис.46. Силы, действующие на поверхностный слой молекул жидкости.

Т.к. сила межмолекулярного взаимодействия быстро убывает с расстоянием между ними  $F \sim \frac{1}{2^7}$ , то можно считать, что данная молекула взаимодействует лишь с теми молекулами окружающего вещества, которые попали в ее радиус ее молекулярного действия.

$$F_1 = 0, F_2 \neq 0, F_3 > F_2.$$

Когда молекула (1) располагается в толще жидкости, то ее сфера молекулярного действия заполнена симметрично и результирующая сила, действующая на нее со стороны окру-

жающих молекул в среднем равна нулю. В случае (2) молекула попадает в поверхностный слой, часть сферы молекулярного действия оказывается за пределами жидкости и несимметричность в заполнении ее молекулами, приводит к появлению результирующей силы ( $F_2 \neq 0$ ). Чем ближе к поверхности находится молекула, тем большей будет результирующая сила ( $F_3 > F_2$ ). Таким образом наличие силы межмолекулярного взаимодействия приводит к тому, что у молекул поверхностного слоя, по сравнению с глубинными появляется дополнительная потенциальная энергия.

Пусть  $U_{cp}$  - среднее значение этой энергии. Тогда все молекулы поверхностного слоя будут иметь энергию:

$$u_{пов} = nSR_M u_{cp} = \sigma S$$

$\sigma$  - коэффициент поверхностного натяжения.

Коэффициент поверхностного натяжения характеризует пару контактирующих веществ, если второе вещество не указано, то подразумеваем, что это насыщенный пар этой жидкости; с ростом температуры коэффициент поверхностного натяжения уменьшается и при критической температуре обращается в ноль.

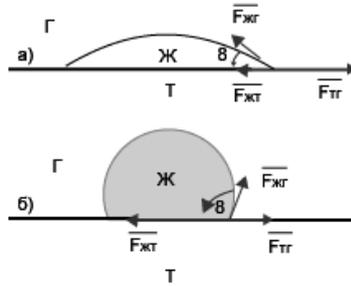


Рис.47. Смачивание

Потенциальная энергия жидкости складывается из двух величин: потенциальной энергии во внешних силовых полях и поверхностной потенциальной энергии.

$$\Pi = u_d + u_{\text{пов}}$$

Если объем жидкости велик, то  $u_{\text{грав}} \gg u_{\text{пов}}$  и жидкость стремится принять форму, при которой ее центр тяжести принимает самое низкое положение: свободная поверхность плоская и горизонтальная. Если объем жидкости мал, то  $u_{\text{грав}} \ll u_{\text{пов}}$  и жидкость стремится принять форму с наименьшей поверхностью: маленькие капли жидкости имеют сферическую форму. Поверхностное натяжение стремится сократить поверхность жидкости; сила поверхностного натяжения направлена по касательной к поверхности.

#### Капиллярное давление

Наличие поверхностного натяжения приводит к тому, что давление под искривленной поверхностью отличается от внешнего давления.

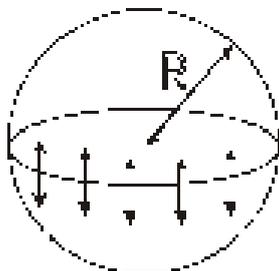


Рис.48.

$$\begin{aligned} F_{\text{пов}} &= \sigma 2\pi R \\ S &= \pi R^2 \end{aligned}$$

$$P_{\text{кап}} = \frac{F_{\text{пов}}}{S} = \frac{2\sigma}{R} \text{ (только сферическая поверхность);}$$

$$P_{\text{кап}} = \frac{\sigma}{R} \text{ (цилиндр).}$$

## Капилляры

Это нарушение закона сообщающихся сосудов.

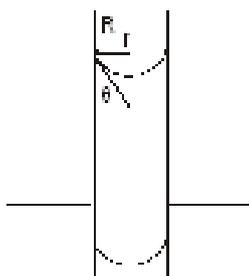


Рис.49. Капиллярное давление

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

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

## 2.2.4 Свойства твердых тел

Отличительным свойством твердых тел является их способность сохранять форму несмотря на действие внешних сил

Твердые тела можно разделить на две группы:

- 1) аморфные,
- 2) кристаллические.

Аморфные тела отличаются от кристаллических тел тем, что их свойства не зависят от направления, они изотропны.

Твердые аморфные тела можно рассматривать как жидкости с очень большой вязкостью. При увеличении температуры все свойства вещества плавно изменяются: вязкость постепенно уменьшается и твердое состояние постепенно превращается в жидкость. Микроструктура твердого аморфного

вещества подобна микроструктуре жидкости, наблюдается порядок в расположении ближайших друг к другу частиц, однако упорядоченность не прослеживается, если расстояние между частицами превышает несколько диаметров молекул.

Свойства твердых кристаллических тел зависят от направления, они анизотропны. При изменении температуры кристаллического вещества его свойства плавно изменяются до тех пор, пока не будет достигнута некоторая определенная для данного вещества при заданном давлении температура, которая называется температурой плавления. Нагревание кристаллического вещества при температуре плавления приводит к тому, что оно превращается в жидкость при той же температуре, при этом все свойства вещества скачком изменяются.

Процесс плавления кристаллического вещества происходит при подводе к нему тепла:

$$Q = m\lambda$$

$m$  - масса кристаллического вещества, превращенного в жидкость,

$\lambda$  - удельная теплота плавления - скалярная ФВ численно равная тому количеству теплоты, которое необходимо сообщить единице массы кристаллического вещества взятого при температуре плавления, чтобы превратить его в жидкость при той же температуре.

Кристаллические вещества встречаются в виде монокристаллов, которые могут достигать значительных размеров и в виде поликристаллов. Поликристалл представляет собой множество хаотически расположенных сросшихся между собой мелких монокристаллов. Анизотропия свойственна только лишь в пределах каждого монокристалла, поликристаллические вещества не обладают анизотропией свойств вследствие хаотического расположения отдельных кристаллов. Анизотропия свойств кристаллических веществ обусловлена тем, что микрочастицы вещества (молекулы,

атомы, или ионы) расположены в строго определенном порядке друг относительно друга, причем эта упорядоченность наблюдается в пределах всего кристалла (дальний порядок).

Периодически расположенные в пространстве частицы вещества образуют кристаллическую решетку. Те точки пространства которые соответствуют равновесному положению частиц называются узлами кристаллической решетки. Вся кристаллическая решетка может быть получена путем периодического повторения в трех измерениях одного и того же элемента - элементарной кристаллической ячейки.

#### Физические типы кристаллов

1) Ионные кристаллы (NaCl). В узлах кристаллической решетки в трехмерном шахматном порядке расположены ионы  $Na^+$  и  $Cl^-$  ионы удерживаются силами электростатического взаимодействия.

2) Атомные кристаллы (графит, алмаз). В узлах находятся атомы, взаимодействие между которыми осуществляется за счет обмена валентными электронами (ковалентная связь).

3) Молекулярные кристаллы (лед, кислород, азот). В узлах находятся молекулы, которые взаимодействуют друг с другом силами Ван-дер-Ваальса (межмолекулярные).

4) Металлические кристаллы. В узлах решетки находятся положительные ионы, валентные электроны являются общими, они движутся хаотически, образуя электронный газ.

#### Теплоемкость твердых тел

Рассмотрим химически простое твердое вещество. В этом случае каждая частица вещества совершает трехмерные колебания и обладает средней энергией:

$$E_{cp} = 3kT$$

Один моль вещества обладает энергией:  $u_\mu = 3kTNa = 3RT$

Закон Дюлонга и Пти

$$C_\mu = \frac{Q}{\Delta T} = \frac{\Delta u + A}{\Delta T} \approx \frac{\Delta u}{\Delta T} = 3R$$

При увеличении температуры амплитуда колебаний частиц увеличивается и из-за несимметричности зависимости  $(P,r)$  увеличивается среднее расстояние между частицами. Это приводит к тепловому расширению, т.е. к увеличению объема и линейных размеров тела:

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

$$l = l_0(1 + \beta t)$$

$\alpha$  - коэффициент объемного расширения;

$\beta$  - коэффициент линейного расширения ( $\alpha=3\beta$ )

### 3. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

**Электродинамика** - это раздел физики в котором изучаются законы электромагнитного взаимодействия.

Электромагнитные явления имеют место в природе: молния, полярное сияние, магнитное поле Земли; широко используются в технике: электрическое освещение, электродвигатели, радиотехника и электроника.

**Электростатика** - это раздел электродинамики, посвященный взаимодействию неподвижных электрических зарядов.

#### 3.1 ВАЖНЕЙШИЕ ПОНЯТИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИКИ

- 1) Электрический заряд;
- 2) Электрическое поле.

Эти понятия не могут быть раскрыты через понятия, введенные ранее в механике, термодинамике и молекулярно-кинетической физике. Для того, чтобы раскрыть смысл понятия электрического заряда необходимо обратиться к экспериментальному изучению электрических явлений.

В обычных условиях небольшие макроскопические тела друг с другом на расстоянии практически не взаимодействуют, т.е. силы их притяжения друг к другу много меньше сил с которыми они притягиваются к земле. Однако если эти тела привести в соприкосновение со стеклянным стержнем, натертым о шелк, то между ними появятся силы отталкивания, соизмеримые с силами притяжения этих тел к Земле. Такое взаимодействие называется электростатическим и объясняется появлением у тел электрического заряда.

**Электрический заряд** - это скалярная ФВ определяющая интенсивность электромагнитного взаимодействия (есть частицы без заряда, нет заряда без частицы).

Опыты показали, что электрические заряды обладают следующими свойствами:

1) Существуют два вида зарядов: одному присвоен знак "+", другому "-". Положительным условно считается заряд, который появляется на стекле, при натирании его о шелк; отрицательным - заряд, который появляется на пластмассе при натирании ее о мех.

2) Заряды одинакового знака отталкиваются друг от друга, противоположного - притягиваются.

3) Заряд системы равен алгебраической сумме зарядов тел, входящих в систему:

$$q_{\text{сист}} = \sum_i q_i$$

- свойство аддитивности электрических зарядов

4) Заряд тела не зависит от состояния его движения ( $\vec{v}$ ;  $\vec{a}$ ).

5) Заряд электрически изолированной системы не изменяется с течением времени (Закон сохранения электрической энергии).

Система называется электрически изолированной, если она окружена оболочкой, не проницаемой для заряженных тел. В электрически изолированной системе количество заряженных тел может изменяться.

б) Заряды любых тел оказываются пропорциональны величине:

$e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл, ее называют элементарным электрическим зарядом. Заряд любого тела может изменяться на величину:

$$\Delta q = ne$$

где  $n$  - целое число.

По современным представлениям элементарный заряд представляет собой свойство частиц из которых состоят атомы и молекулы. Например, электрон имеет заряд  $q = -e$  протон  $q = e$ . Известны также частицы, не имеющие электрического заряда.

Представление о величине элементарного заряда можно получить, исследуя законы электролиза (Фарадей).

Один моль одновалентного вещества (например Ag) можно получить на электроде, пропуская через электролит заряд  $q$ , равный 96500 Кл, число положительных ионов, восстановленных на электроде равно  $N_A$ . Тогда заряд одного иона равен:  $e = \frac{9,6 \cdot 10^4}{6 \cdot 10^{23}} = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл.

Непосредственное измерение заряда электрона было выполнено в 1909г. Милликенем (США).

### Закон Кулона

Этот закон описывает взаимодействие неподвижных точечных зарядов, расположенных в вакууме. Закон экспериментально в 1785г.

Точечный заряд - это заряженное тело размер, которого много меньше расстояния, на котором оценивается действие заряда.

Два неподвижных точечных заряда расположенные в вакууме взаимодействуют друг с другом с силами, величины которых пропорциональны произведению зарядов и обратно пропорциональны квадрату расстояния между ними. Направлены силы вдоль прямой, соединяющей заряженные тела.

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

Единицы измерения:

В СИ основной электрической единицей измерения является единица силы тока 1А, которая устанавливается по магнитному взаимодействию проводников с током.

1Кл=1А·1с. В этом случае коэффициент пропорциональности в законе кулона  $k \approx 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Нм}^2}{\text{Кл}^2}$ ;  $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ ;  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Нм}^2}$  -электрическая постоянная.

## 3.2. ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

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

Электростатическое поле - это частный случай электромагнитного поля.

Электростатическое поле - материальная среда, создаваемая неподвижным зарядом в пространстве, посредством которого осуществляется взаимодействие зарядов на расстоянии. Электростатическое поле проявляет себя по действию на неподвижные и движущиеся заряды.

Пробный заряд - это заряд с помощью которого определяют структуру электрического поля. Пробный заряд должен удовлетворять следующим условиям:

1) Заряженное тело должно быть настолько малым, чтобы его можно было считать точечным зарядом.

2) Величина электрического заряда должна быть настолько мала, чтобы он не вызывал перераспределения зарядов по телу поле которого исследуется.

В каждой точке электрическому полю может быть приписана количественная характеристика - напряженность поля, которая является силовой характеристикой поля в данной точке.

**Напряженность электрического поля** ( $\vec{E}$ ) - это векторная ФВ, численно равная силе, действующей на единичный положительный заряд, помещенный в данной точке, и совпадающая с этой силой по направлению.

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

Принцип суперпозиции электрических полей (сложение)

Пусть поле создается системой электрических зарядов, тогда в каждой точке напряженность поля будет равна векторной сумме напряженностей полей, создаваемых в данной точке каждым зарядом в отдельности.

$$\vec{E} = \sum_i \vec{E}_i$$

Графически электрическое поле изображается с помощью линий напряженности (силовых линий), которые обладают следующими свойствами:

1) Напряженность поля в любой точке направлена по касательной к линии напряженности, проходящей через эту точку.

2) Линии напряженности выходят из положительного заряда и заканчиваются на отрицательном заряде или уходят в бесконечность.

3) Линии напряженности не пересекаются друг с другом.

4) плотность линий напряженности пропорциональна величине напряженности поля.

**Поле точечного заряда.**

$$E = \frac{F}{q_0} = k \frac{qq_0}{r^2 q_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}$$

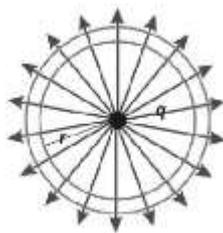


Рис.50. Поле точечного заряда

Рис.51. Поле двух разноименных точечных зарядов.

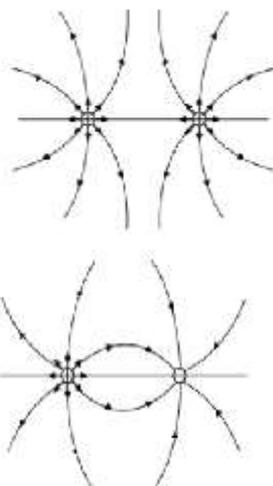


Рис.52. Поле двух одноименных точечных зарядов.

### Поток вектора напряженности

$$\Delta\phi = E\Delta S \cos \alpha$$

Участок поверхности настолько мал, чтобы выполнялись условия:

- 1) Поверхность плоская.
- 2) Напряженность поля в пределах выделенного участка поверхности постоянна по величине и направлению.
- 3) Угол между нормалью к поверхности и вектором напряженности не изменяется в пределах данного участка.

Для того, чтобы определить поток вектора напряженности через произвольную поверхность необходимо проделать следующие операции:

- 1) Разбиваем всю поверхность на столь малые участки, чтобы каждый из них можно было считать плоским, а

направление поля в пределах каждого участка постоянным по величине и направлению.

2) Для каждого из участков определяем величины  $E_i, \Delta S_i, \alpha_i$ .

3) Для каждого участка находим элементарный поток:  
 $\Delta\phi_i = E_i \Delta S_i \cos \alpha_i$

4) Находим поток через всю поверхность, как алгебраическую сумму элементарных потоков.

**Пример.** Найти поток вектора напряженности через сферическую поверхность радиуса  $R$  в центре которой находится заряд  $q$ .

$$\begin{aligned} \cos \alpha &= (\vec{E}; \vec{n}) = 1 \\ \Delta\phi &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{R^2} \Delta S \\ \Phi &= \sum_i \Delta\phi_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{R^2} \sum_i \Delta S_i \\ \sum_i \Delta S_i &= 4\pi R^2 \\ \Phi &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{R^2} 4\pi R^2 \\ \Phi &= \frac{q}{\epsilon_0} \end{aligned}$$

Поток не зависит от размеров сферы и не изменится, если сферическую поверхность, включающую заряд, заменить другой поверхностью, включающей заряд. Если замкнутая поверхность не включает заряд, то поток через эту поверхность равен нулю. Физический смысл потока вектора напряженности электрического поля - это количество линий напряженности выходящих из поверхности.

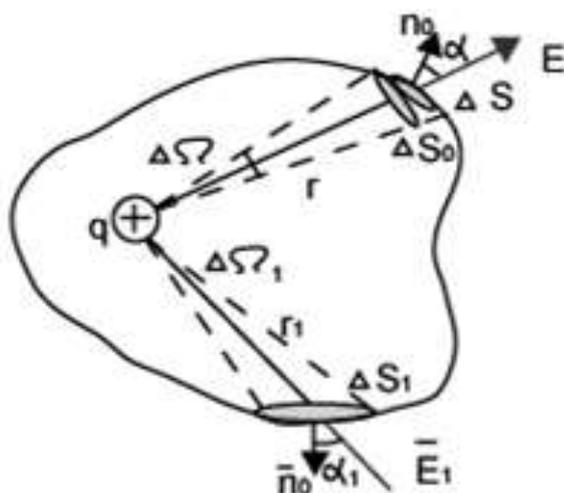


Рис.53. Поток через поверхность, включающую заряд

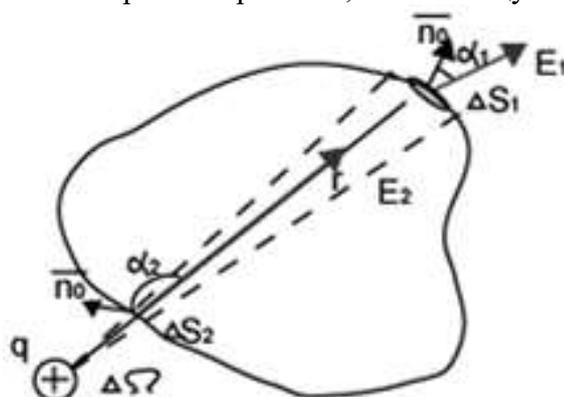


Рис.54. Поток через поверхность, не включающую заряд

### Теорема Гаусса

Поток вектора напряженности через произвольную замкнутую поверхность пропорционален алгебраической сумме зарядов, охваченных этой поверхностью.

$$\phi_{\text{замкн.пов}} = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_i q_i$$

Эта теорема справедлива для электростатического поля в вакууме.

### Частные виды полей

1) Поле равномерно заряженной сферы

$$\text{а) } r < R, E 4\pi r^2 = \frac{1}{\varepsilon_0} 0, \Rightarrow E = 0;$$

$$\text{б) } r \geq R, E 4\pi r^2 = \frac{1}{\varepsilon_0} q, \Rightarrow E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q}{r^2}$$

Структура поля и его напряженность при  $r \geq R$  совпадает с полем точечного заряда, расположенного в центре сферы и равного по величине заряду сферы.

2) Поле равномерно заряженного шара

$\rho = \frac{q}{V}$  - объемная плотность заряда.

$$\text{а) } r < R, V = \frac{4}{3}\pi r^3, E 4\pi r^2 = \frac{1}{\varepsilon_0} \frac{4}{3}\pi r^3 \rho, \Rightarrow E = \frac{\rho r}{3\varepsilon_0};$$

$$\text{б) } r \geq R, E 4\pi r^2 = \frac{1}{\varepsilon_0} \frac{4}{3}\pi R^3 \rho, \Rightarrow E = \frac{\rho R^3}{3\varepsilon_0 r^2}.$$

3) Бесконечная нить (очень тонкая)

$\lambda = \frac{q}{l}$  - линейная плотность заряда.

$$E 2\pi r h = \frac{1}{\varepsilon_0} \lambda h, \Rightarrow E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{2\lambda}{r}$$

4) Поле равномерно заряженной бесконечной плоскости

$\sigma = \frac{q}{S}$  - поверхностная плотность заряда.

$$E 2S = \frac{1}{\varepsilon_0} S\sigma \Rightarrow E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}$$

Такая плоскость создает однородное поле: напряженность не зависит от расстояния до заряженной поверхности. Густота линий везде должна быть одинакова.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}$$

Работа электростатического поля

Работа сил электростатического поля, не зависит от формы траектории, по которой происходит перемещение заряда, а зависит только от начальной и конечной точки траектории.

Из этого следует, что силы электростатического взаимодействия являются консервативными, а электростатическое поле является потенциальным, т.е. каждой его точке может быть приписана энергетическая характеристика - потенциал.

1) Вычислим работу электростатических сил по перемещению точечного заряда  $q_0$ , в случае, если поле однородно.

$$A_{\text{эл}} = \vec{F}_{\text{эл}} \vec{S} = q \vec{E} \vec{S} = qES \cos \alpha = qES_E$$

Другими словами, работа электрических сил по перемещению заряда  $q_0$  в однородном электрическом поле равна произведению заряда на напряженность поля и на расстояние  $d$  на которое переносится заряд вдоль линий напряженности электрического поля.

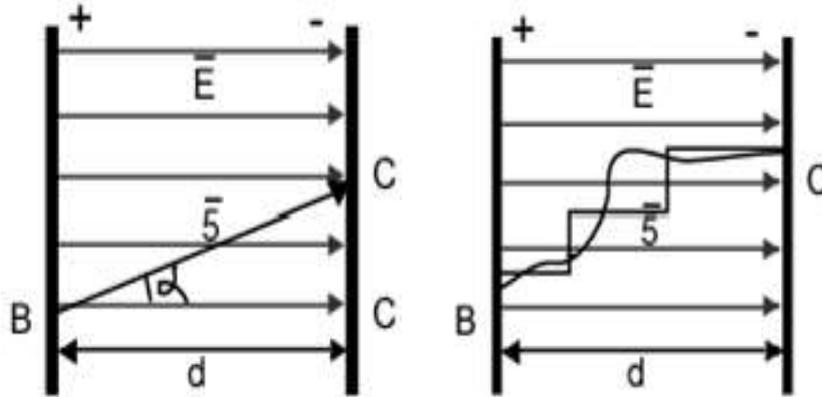


Рис.55. Работа однородного поля по перемещению точечного заряда

2) Вычислим работу электрических сил поля точечного заряда, для этого будем перемещать пробный точечный заряд  $q_0$  из данной точки на бесконечность по радиальной траектории, далее разобьем всю траекторию на множество участков

для каждого из которых выполняется условие малости перемещения и для каждого из участков вычислим элементарную работу  $\Delta A_i$ :

$$\Delta A_i = q_0 E S \cos \alpha = q_0 E \Delta r = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_0}{r^2} \Delta r$$

Затем просуммируем полученные выражения, что соответствует интегрированию:

$$A = \frac{1qq_0}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = \Pi_1 - \Pi_2 = W_1 - W_2$$

$$W = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_0}{r} + const$$

Иногда const в выражении для W определяют исходя из следующих условий: W=0 если заряды удаляются друг от друга бесконечно далеко.

Потенциал электростатического поля

**Разность потенциалов** - скалярная Ф.В. численно равная работе электростатических сил по перемещению единичного положительного заряда из точки 1 в точку 2:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{эл\ 1 \rightarrow 2}}{q_0} \Rightarrow A = -q\Delta\varphi$$

**Потенциал** - это скалярная Ф.В. численно равная работе, совершенной силами электростатического поля при перемещении его из данной точки в точку, бесконечно удаленную от заряда, создающего поле.

$$\varphi = \frac{A_{эл\ 1 \rightarrow \infty}}{q_0} \quad (\varphi_\infty = 0)$$

Связь между напряженностью и потенциалом:

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = -(\varphi_1 - \varphi_2) = -E_l \Delta l \Rightarrow -\frac{\Delta\varphi}{\Delta l} = E_l$$

$$\begin{cases} E_x = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta x} \\ E_y = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta y} \end{cases}$$

**Эквипотенциальная поверхность** - геометрическое место точек с одинаковым потенциалом

### Проводники в электростатическом поле

Все вещества в зависимости от их свойств можно разделить на три группы:

- 1) проводники (конц. своб. носит.  $10^{22}$  на  $1\text{см}^3$ ),
- 2) полупроводники (конц. своб. носит.  $10^{14}$  на  $1\text{см}^3$ ),
- 3) диэлектрики (изоляторы) (конц. своб. носит.  $10^8$  на  $1\text{см}^3$ ).

К проводникам, например относятся металлы. В металлах положительные ионы расположены в узлах кристаллической решетки, валентные электроны обобществляются, т.е. они принадлежат не отдельным атомам, а всему куску металла. Обобществленные электроны могут двигаться под действием бесконечно малых сил по всему объему вещества, независимо от зарядов противоположного знака. Такие электроны называются свободными. Проводниками называются также расплавы электролитов. В этом случае разрушается связь между положительными и отрицательными ионами, ионы каждого знака могут двигаться независимо от ионов противоположного знака. Таким образом, в электролитах свободными зарядами являются положительные и отрицательные ионы.

### Электростатическая индукция

Поместим проводник (для определенности кусок металла) во внешнее электрическое поле; проводник не заряжен. Свободные электроны под действием сил поля начнут смещаться против поля и накапливаться на торце бруска, на противоположном торце останется некомпенсированный положительный заряд.

Заряд, который появляется на торцах проводника во внешнем электростатическом поле называют индуцированным или наведенным.

Явление пространственного разделения положительных и отрицательных зарядов, происходящее в случае смещения свободных элементарных зарядов во внешнем поле называется электростатической индукцией.

После установления равновесия зарядов на проводнике справедливы следующие соотношения:

1) Результирующее поле в любой точке пространства представляет собой сумму двух полей - внешнего поля и поля индукционного заряда; при этом результирующее поле внутри проводника равно нулю.

$$\vec{E} = \vec{E}_{\text{внеш}} + \vec{E}_{\text{индукц}} = 0$$

2) Потенциал всех точек проводника одинаков.

$$\Delta\varphi = \frac{A_{\text{эл}}}{q_0} \quad F_{\text{эл}} = 0; \quad A_{\text{эл}} = 0; \quad \Delta\varphi = 0$$

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

3) Напряженность на поверхности проводника не равна нулю и направлена по нормали к поверхности.

Индукционный заряд располагается по поверхности проводника в слое, толщина которого соизмерима с размерами молекул. Во всей внутренней области проводника объемная плотность заряда равна нулю. При размещении проводника во внешнем электрическом поле, поле искажается, даже если проводник не заряжен.

Рассмотрим заряженный проводник при отсутствии внешнего поля.

Опыт показывает, что:

1) Избыточный заряд распределен по поверхности проводника, объемная плотность заряда во всех внутренних точках равна нулю.

Заряд распределен по поверхности неравномерно. Поверхностная плотность заряда  $\sigma = \frac{\Delta q}{\Delta S}$  ( $\Delta S \rightarrow 0$ ), больше на выпуклостях и меньше во впадинах, причем больше там, где больше кривизна поверхности.

2) В условиях равновесия заряда на проводнике, напряженность поля во внутренней области проводника равна нулю.

3) Потенциал всех точек проводника (внутри и на поверхности) одинаков.

4) На поверхности проводника напряженность поля отличается от нуля и направлена по нормали к поверхности.

#### Экранирование электрического поля

Это явление изучалось Фарадеем. Ряд выводов обобщающих результаты его опытов носят название теоремы Фарадея:

1) Индукционный заряд который появляется на внутренней поверхности проводящей оболочки равен по модулю и противоположен по знаку заряду, окруженному проводящей оболочкой.

$$q' = -q$$

2) Электрическое поле, создаваемое зарядами, находящимися внутри проводящей оболочки и индукционным зарядом, находящимся на внутренней поверхности оболочки равно нулю во всем внутреннем пространстве.

$$q'' = -q' = q \text{ (на внешней поверхности).}$$

Заряд распределен по внешней поверхности равномерно и поле снаружи проводника обладает сферической симметрией.

## Диэлектрики в электрическом поле

Диэлектрики отличаются от проводников тем, что практически не содержат свободных электрических зарядов: концентрация свободных зарядов в диэлектриках меньше, чем в проводниках примерно в  $10^{15}$  степени, поэтому диэлектрики не проводят электрический ток, иначе их называют изоляторами.

Если диэлектрик поместить во внешнее электрическое поле, то он претерпевает изменения, которые в свою очередь приводят к изменению внешнего поля.

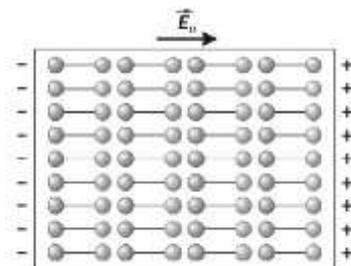


Рис.55. Поляризация диэлектрика

Различают три типа диэлектриков: диэлектрики с неполярными молекулами, диэлектрики с полярными молекулами и ионные кристаллы.

$$\vec{E} = \vec{E}_{\text{стор}} + \vec{E}_{\text{св}}$$

$$E = E_{\text{стор}} - E_{\text{св}} = \frac{E_{\text{стор}}}{\varepsilon}$$

Результирующее поле представляет собой сумму двух полей: поля сторонних зарядов и поля поляризационного заряда. Результирующее поле внутри диэлектрика меньше чем поле стороннего заряда в вакууме в некоторое определенное для данного диэлектрика число раз  $\varepsilon$  ( $\varepsilon$  является характеристикой вещества).

Установим связь между относительной диэлектрической проницаемостью, полем стороннего заряда и поверхностной плотностью связанных зарядов.

$$E_{\text{св}} = \frac{\sigma'}{\varepsilon_0}$$

$$\frac{E_{\text{стор}}}{\varepsilon} = E_{\text{стор}} - \frac{\sigma'}{\varepsilon_0}$$

$$\frac{\sigma'}{\varepsilon_0} = E_{\text{стор}} - \frac{E_{\text{стор}}}{\varepsilon}$$

$$\sigma' = \varepsilon_0 E_{\text{стор}} \left(1 - \frac{1}{\varepsilon}\right)$$

Поведение линий напряженности на границе с диэлектриком.

У диэлектриков поверхность не является эквипотенциальной, следовательно, линии напряженности входят в поверхность диэлектрика не под прямым углом, внутри диэлектрика линии напряженности отклоняются от нормали.

### 3.3 ЭЛЕКТРОЕМКОСТЬ

Электроемкость уединенного проводника

Проводник называется уединенным, если он удален бесконечно далеко от всех других тел, как заряженных, так и не заряженных.

Опыт показывает, что заряд уединенного проводника прямо пропорционален его потенциалу:

$$q = C\varphi$$

Это соотношение предполагает, что потенциал в точке, бесконечно удаленной от проводника равен нулю.

$C$  - электроемкость проводника, она оказывается независимой ни от заряда проводника ни от его потенциала, она определяется лишь геометрическими свойствами проводника, т.е. его формой и размерами. Это обусловлено тем, что весь его избыточный заряд расположен на поверхности про-

водника независимо от его электропроводности и других физических свойств. Для экспериментального определения емкости какого-либо уединённого проводника можно использовать соотношение  $C = \frac{q}{\varphi}$ , т.е. необходимо измерять заряд, сообщаемый проводнику и его потенциал. При использовании этого соотношения следует помнить, что ёмкость не зависит ни от заряда, ни от потенциала для конкретного проводника.

Если сравнивать емкости (C) различных проводников заряженных до одинакового значения потенциала ( $\varphi$ ), то C будет больше у того проводника, которому сообщен больший заряд ( $>q$ ); если всем проводникам сообщить одинаковый заряд, то емкость (C) будет большей у того проводника, потенциал которого меньше.

Влияние окружающих тел на емкость проводника.

$$C_0 = \frac{q}{\varphi}$$

$$\varphi_{\text{нов}} = \varphi + \varphi_- + \varphi_+ < \varphi$$

$$|\varphi_-| > |\varphi_+|$$

$$C_{\text{нов}} = \frac{q}{\varphi_{\text{нов}}} > C_0$$

Таким образом, наличие окружающих тел приводит к уменьшению потенциала ( $\varphi$ ) проводника и соответственно к росту его электроёмкости (C).

### Плоский конденсатор

Представляет собой систему из двух проводящих пластин, называемых обкладками, расположенных параллельно друг другу, причем ширина зазора много меньше линейных размеров пластин.

Конденсатор заряжается так, чтобы обкладки имели равные по модулю и противоположные по знаку заряды, тогда в пространстве между обкладками возникает однородное электрическое поле с напряженностью:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}, \sigma = \frac{q}{S}.$$

Во внешнем поле  $E=0$ .

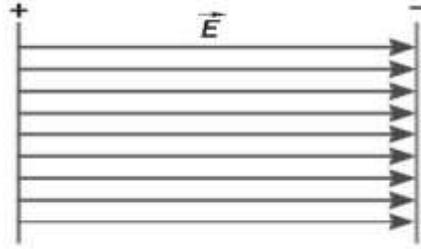


Рис.56. Поле внутри идеального конденсатора

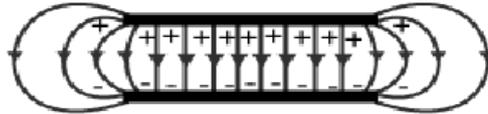


Рис.57. Поле реального конденсатора

Поэтому окружающие конденсатор тела не поляризуются и не оказывают влияния на электрическую емкость конденсатора.

Емкость конденсатора определяется отношением модуля заряда одной обкладки к разности потенциалов между обкладками:

$$C = \frac{q}{\Delta\varphi}$$

Вычислим емкость плоского конденсатора без диэлектрика:

$$\Delta\varphi = Ed = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}d = \frac{qd}{\varepsilon_0 S}$$

$$C = \frac{q\varepsilon_0 S}{qd} = \frac{\varepsilon_0 S}{d}$$

Если пространство между обкладками было заполнено однородным диэлектриком, то:

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

### Соединение конденсаторов

Параллельное соединение.

$$\Delta\varphi = U$$

$$1. U_1 = U_2 = U$$

$$2. q = q_1 + q_2$$

$$C_1 = \frac{q_1}{U_1}; C_2 = \frac{q_2}{U_2}; C = \frac{q}{U}$$

$$3. CU = C_1U + C_2U \Rightarrow C = C_1 + C_2$$

Последовательное соединение.

$$1. q_1 = q_2 = q$$

$$2. U = U_1 + U_2$$

$$3. \frac{q}{C} = \frac{q_1}{C_1} + \frac{q_2}{C_2} \Rightarrow \frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

Слоистые конденсаторы.

$$\frac{1}{C} = \frac{d_1}{\varepsilon_0 \varepsilon_1 S} + \frac{d_2}{\varepsilon_0 \varepsilon_2 S} = \frac{1}{\varepsilon_0 S} \left( \frac{d_1}{\varepsilon_1} + \frac{d_2}{\varepsilon_2} \right)$$

$$C = \frac{\varepsilon_0 S}{\frac{d_1}{\varepsilon_1} + \frac{d_2}{\varepsilon_2}}$$

### Энергия заряженного конденсатора

Вычислим силу, действующую на обкладку конденсатора:

$$F = qE = \frac{q^2 d}{2\epsilon_0 S d} = \frac{q^2}{2Cd}$$

Энергия заряженного конденсатора определяется той работой, которую совершают электрические силы при полном разряде конденсатора, например, при соприкосновении обкладок.

$$W = A_{\text{эл}} = Fd = \frac{dq^2}{2C} = \frac{CU^2}{2}$$

### 3.4 ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

**Сила тока** - это скалярная ФВ численно равная заряду, проходящему через выделенную поверхность за единицу времени.

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

Величина силы тока не зависит от того, брать сечение: перпендикулярно или под углом к оси.

**Плотность тока** - векторная ФВ, численно равная силе тока через поверхность единичной площади, расположенную перпендикулярно движению носителей.

$$\mathbf{j} = \frac{I}{S}; \mathbf{j} \parallel \vec{u}$$

Здесь  $\vec{u}$  – скорость направленного движения положительных носителей заряда.

В общем случае связь между силой тока и плотностью тока дается соотношением:

$$I = \vec{j} \cdot \vec{S} = jS \cos(u; \vec{n})$$

Направление вектора  $\mathbf{j}$  совпадает с направлением движения положительных носителей. Формула справедлива, если:

- 1) поверхность плоская,
- 2) плотность тока во всех точках одинакова.

$$\mathbf{j} = \frac{qnSv\Delta t}{\Delta tS} = qn\vec{v}$$

Для возникновения электрического тока необходимо выполнение двух условий:

1) Наличие в пространстве свободных электрических зарядов.

2) Наличие силы, которая, действуя на свободные заряды вызывает их упорядоченное движение.

Вообще говоря, эти силы могут быть любыми по физической природе, кроме электростатических, их принято называть сторонними.

Если ток не изменяется с течением времени, то его называют стационарным.

Для того, чтобы ток был постоянным необходимо:

1) Чтобы концентрация свободных носителей не изменялась с течением времени.

2) Чтобы скорость свободных носителей не изменялась с течением времени.

Если речь идет о токе в проводниках, то оба условия автоматически выполняются, если на концы проводника подать постоянную разность потенциалов (и сохранять температуру проводника).

В случае, если ток является постоянным, избыточные заряды могут находиться только лишь на поверхности проводника или в местах неоднородностей проводящей среды. Таким образом внутри однородные проводники, как и в случае электростатики оказываются электрически нейтральными, однако в отличие от электростатики напряженность поля внутри проводника не равна нулю, а на поверхности не перпендикулярна поверхности.

Подобно полю неподвижного заряда электрическое поле в случае стационарного тока оказывается потенциальным.

#### Закон Ома для однородного участка цепи

Участок цепи называется однородным, если на свободные заряды не действуют сторонние силы.

Опыт показывает, что ток возникает в том случае, если на концах проводника поддерживаются неодинаковые потенци-

алы. При этом ток оказывается пропорционален разности потенциалов, кроме того, величина силы тока определяется также свойствами материала: формой и размерами проводника.

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R}$$

$R$  - учитывает перечисленные выше свойства проводника и называется электрическим сопротивлением проводника.

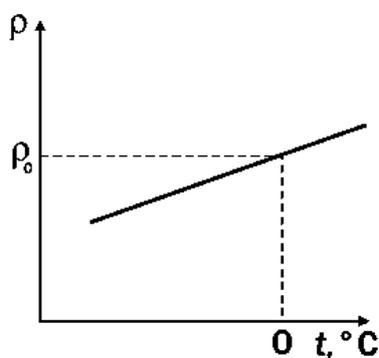


Рис.58. Зависимость удельного сопротивления проводника от температуры

Если проводник цилиндрический, то сопротивление проводника оказывается пропорционально его длине и обратно пропорционально площади поперечного сечения:

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

$\rho$  определяется типом вещества и его температурой.

Закон Ома для однородного участка цепи в дифференциальной форме.

$$I = \frac{(-\Delta\varphi)S}{\rho l}$$

$$\frac{I}{S} = \frac{1}{\rho} \left( -\frac{\Delta\varphi}{l} \right)$$

$$j = \frac{1}{\rho} E$$

$$\vec{j} = \lambda \vec{E}$$

### Разветвленная цепь

Узлом цепи называют точку, в которой сходится более двух проводников.

Токам, входящим в узел цепи и выходящим из узла, приписываются противоположные знаки.

### I правило Кирхгофа

Алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле цепи равна нулю

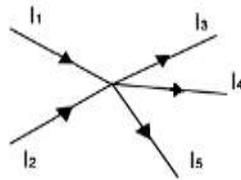


Рис.59. Узел цепи

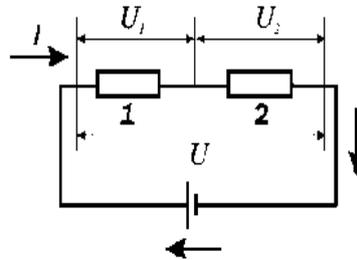


Рис.60. Последовательное соединение проводников

- 1)  $I_1 = I_2 = I$
- 2)  $U_1 + U_2 = U$

$$R = R_1 + R_2$$

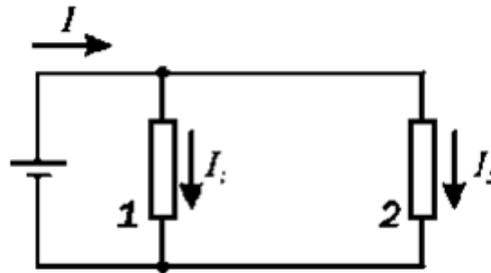


Рис.61. Параллельное соединение проводников

- 1)  $I = I_1 + I_2$
- 2)  $U_1 = U_2 = U$

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

### Источники тока (ИТ)

В ИТ на свободные электрические заряды кроме электростатических сил действуют сторонние силы.

Работа сторонних сил представляет собой количественную меру превращения различных видов энергии в энергию электрического тока.

Любой ИТ характеризуется двумя величинами:

1) ЭДС - электродвижущая сила - обозначается  $\varepsilon$  [В].

2) Внутреннее сопротивление источника  $r$ .

ЭДС - это скалярная ФВ численно равная работе, которую совершают сторонние силы по перемещению единичного положительного заряда по замкнутой цепи или по участку цепи:

$$\varepsilon = \frac{A_{\text{стор}}}{q}$$

Пространство или проводник, в котором действуют сторонние силы оказывается удобным рассматривать, как поле сторонних сил, которое в каждой точке описывается векторной характеристикой: напряженностью поля сторонних сил.

$$\vec{F}_{\text{стор}} = q\vec{E}_{\text{стор}} \Rightarrow \vec{E}_{\text{стор}} = \frac{\vec{F}_{\text{стор}}}{q}$$

Напряженность поля сторонних сил - это векторная ФВ численно равная сторонним силам, действующим на единичный положительный заряд, и совпадает с этой силой по направлению.

$$\varepsilon_{12} = \frac{A_{\text{стор}}}{q} = \frac{\vec{F}_{\text{стор}}\vec{l}}{q} = \vec{E}_{\text{стор}}\vec{l}$$

В общем случае на участок цепи на заряд действуют одновременно и электрические и сторонние силы.

$$\vec{F}_{\text{рез}} = q(\vec{E} + \vec{E}_{\text{стор}})$$

$$A_{\text{рез } 12} = \vec{F}_{\text{рез}}\vec{l} = q(\vec{E}\vec{l} + \vec{E}_{\text{стор}}\vec{l}) = q(\varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_{12})$$

Напряжение или падение напряжения - это скалярная ФВ численно равная работе результирующих сил по перемещению единичного заряда по рассматриваемому участку цепи:

$$U_{12} = \frac{A_{\text{рез } 12}}{q} = \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_{12}$$

Закон Ома для неоднородного участка цепи

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R}; \vec{j} = \lambda \vec{E}$$

$$\vec{j} = \lambda(\vec{E} + \vec{E}_{\text{стоп}})$$

Закон Ома для замкнутой цепи

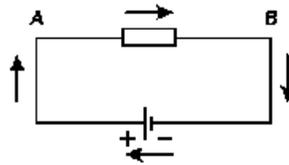


Рис.62. Замкнутая цепь

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}$$

Второе правило Кирхгофа

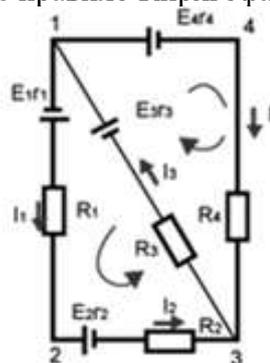


Рис.63. Замкнутые контуры

$$\sum_i I_i R_i = \sum_i \varepsilon_i$$

Работа и мощность постоянного электрического тока.

При протекании тока по участку электрической цепи работу совершают как электрические, так и сторонние силы.  $A_{\text{эл сил}} = q(\varphi_1 - \varphi_2)$  Если ток постоянен, то  $q = It$ , и следовательно:

$$A = I(\varphi_1 - \varphi_2)t$$

1) Если участок цепи **однороден**, то сторонних сил нет и  $\varphi_1 - \varphi_2 = U$ , то:

$$A_{\text{эл}} = IUt$$

Мощность электрических сил - это скорость совершения работы:

$$P_{\text{эл}} = \frac{A_{\text{эл}}}{t} = IU$$

Работа электрических сил является количественной мерой превращения энергии электрического поля в другие виды энергии - тепловую, механическую и т.д. В металлических проводниках тепловое действие тока оказывается практически единственным действием, т.е.  $A_{\text{эл}} = Q$ ;  $Q$  - приращение внутренней энергии проводника и внешней среды.

В общем случае тепловое действие тока описывается **законом Джоуля-Ленца**:

$$Q = I^2 R t$$

здесь  $Q$  - это приращение внутренней энергии проводника, при условии, что нет теплообмена с окружающей средой; или

- количество тепла которое выделится из проводника с током в окружающую среду при условии, что температура проводника не изменится.

$Q$  - не зависит от того, чем вызван ток.

2) Если участок цепи **неоднороден**, то на этом участке работу совершают как электрические, так и сторонние силы

$$A_{\text{стор}} = q\varepsilon = I\varepsilon t$$

Работа как сторонних, так и электрических сил может принимать как положительные, так и отрицательные значения, в зависимости от взаимного направления движения носителей и соответствующей силы. В случае неоднородного участка цепи работой электрического тока называют суммар-

ную работу электрических и сторонних сил.

$$\begin{aligned} A_{\text{тока}} &= A_{\text{эл}} + A_{\text{стор}} = I(\varphi_1 - \varphi_2)t + I\varepsilon t \\ &= I(\varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon)t = IUt \end{aligned}$$

В общем случае работа электрического тока  $Q$  и количество теплоты не совпадают (сравните электрическую плитку и электрический двигатель).

**Ток короткого замыкания** - это ток, который возникает в замкнутой электрической цепи, если сопротивление нагрузки обращается в ноль.  $R \rightarrow 0$

$$I_{\text{кз}} = \frac{\varepsilon}{r}$$

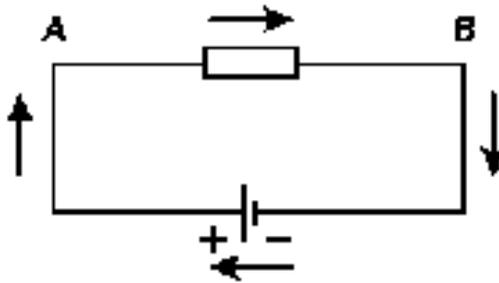


Рис.64.

Вычислим мощность, выделяющуюся в источнике  $P_{ист}$  и нагрузке  $P_{нагр}$  ( $P_{затр}$ ,  $P_{полн}$ ) при протекании электрического тока, в зависимости от силы тока в цепи  $I$ , при этом будем считать, что  $\xi$  и сопротивление  $r$  источника нам известны.

$$P_{ист}(I) = I\xi;$$

$$P_{нагр}(I) = I(\varphi_1 - \varphi_2) = I(\xi - Ir) = I\xi - I^2r;$$

Очевидно, что ток может меняться в пределах от 0 до  $I_{max} = I_{кз} = \frac{\xi}{r}$ .

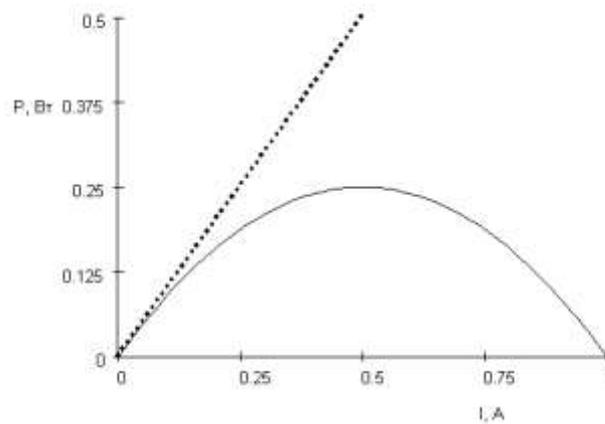


Рис.65. Зависимость мощности электрического тока  $P$ , которая выделяется в нагрузке (сплошная линия) и мощности, которую затрачивает источник (прерывистая линия), от силы тока в цепи, ЭДС=1В,  $r=1\text{Ом}$

Из графика  $P_{нагр}(I)$  видно, что в нагрузке будет выделяться максимальная мощность, когда ток в цепи равен половине  $I_{max}$ , т.е.  $I_0 = \frac{\xi}{2r}$  при этом:

$$P_{max} = \frac{\xi^2}{4r}.$$

Теперь вычислим мощность, выделяемую в источнике  $P_{ист}$  и нагрузке  $P_{нагр}$  ( $P_{затр}$ ,  $P_{полн}$ ) при протекании электрического тока, в зависимости от сопротивления нагрузки  $R$ , при тех же самых условиях.

$$P_{ист}(R) = I\xi = \frac{\xi^2}{R+r};$$

$$P_{нагр}(R) = I(\varphi_1 - \varphi_2) = IIR = \left(\frac{\xi}{R+r}\right)^2 R$$

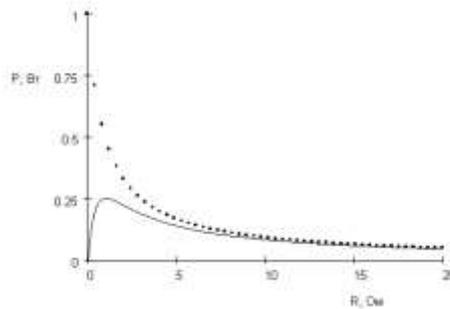


Рис.66. Зависимость мощности электрического тока  $P$ , которая выделяется в нагрузке (сплошная линия) и мощности, которую затрачивает источник (прерывистая линия), от сопротивления нагрузки  $R$ , ЭДС=1В,  $r=1\text{Ом}$

Зависимость  $P_{нагр}(R)$  также имеет максимум, значение которого можно найти следующим образом:

$$\begin{aligned} \left(P_{нагр}(R)\right)'_R &= \left(\left(\frac{\xi}{R+r}\right)^2 R\right)'_R \\ &= \xi^2 \left(\frac{1(R+r)^2 - R \cdot 2(R+r)}{(R+r)^4}\right) = 0 \end{aligned}$$

Отсюда:

$$R + r - 2R = 0$$

при  $R=r$  функция  $P_{нагр}(R)$  имеет максимум, который равен, очевидно:  $P_{max} = \frac{\xi^2}{4r}$ .

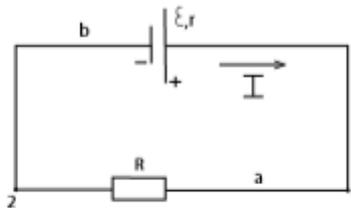
**Пример**

Рис.67

Дано:  $\xi = 2,6$  В;  $\varphi_1 - \varphi_2 = 2,0$  В;  $I = 1$  А;  $t = 2$  с.

Найти:  $A_{\text{стор}}$ ,  $A_{\text{эл}}$ ,  $Q$ ,  $A_{\text{тока}}$ .

Решение.

$$A_{1a2\text{стор}} = 0;$$

$$A_{1a2\text{эл}} = I(\varphi_1 - \varphi_2)t = 4 \text{ Дж};$$

$$A_{1a2\text{тока}} = I(\varphi_1 - \varphi_2)t = 4 \text{ Дж};$$

$$Q_{1a2} = I^2 R t = 4 \text{ Дж}, \left( I = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2)}{R} \right);$$

$$A_{2b1\text{стор}} = I \xi t = 5,2 \text{ Дж};$$

$$A_{2b1\text{эл}} = I(\varphi_2 - \varphi_1)t = -4 \text{ Дж};$$

$$A_{2b1\text{тока}} = I(\varphi_2 - \varphi_1 + \xi)t = 1,2 \text{ Дж};$$

$$Q_{2a1} = I^2 r t = I(\varphi_2 - \varphi_1 + \xi)t = 5,2 \text{ Дж}, \left( I = \frac{(\varphi_2 - \varphi_1 + \xi)}{r} \right).$$

Ответ:  $A_{\text{стор}} = 5,2$  Дж,  $A_{\text{эл}} = 0$  Дж,  $Q = 5,2$  Дж,  $A_{\text{тока}} = 5,2$  Дж.

**Пример.**

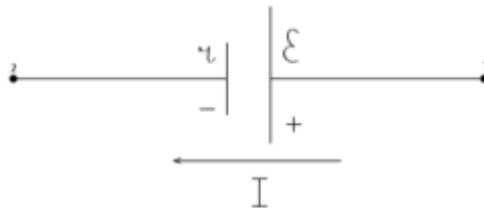


Рис.68

Дано:  $\xi = 2,6$  В;  $\varphi_1 - \varphi_2 = 3$  В;  $I = 1$  А;  $t = 2$  с.

Найти:  $A_{\text{стор}}$ ,  $A_{\text{эл}}$ ,  $Q$ ,  $A_{\text{тока}}$ .

Решение.

$$A_{\text{эл}} = I(\varphi_1 - \varphi_2)t = 6 \text{ Дж};$$

$$A_{\text{стор}} = I(-\xi)t = -5,2 \text{ Дж};$$

$$Q = I^2 r t = I(\varphi_1 - \varphi_2 + \xi)t = 0,8 \text{ Дж}, \left( I = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2 + \xi)}{r} \right);$$

Ответ:  $A_{\text{стор}} = -5,2$  Дж,  $A_{\text{эл}} = 6$  Дж,  $Q = 0,8$  Дж,  $A_{\text{тока}} = 0,8$  Дж.

**КПД источника ( $\eta$ ):**

$$\eta = \frac{A_{\text{внеш}}}{A_{\text{ист}}}.$$

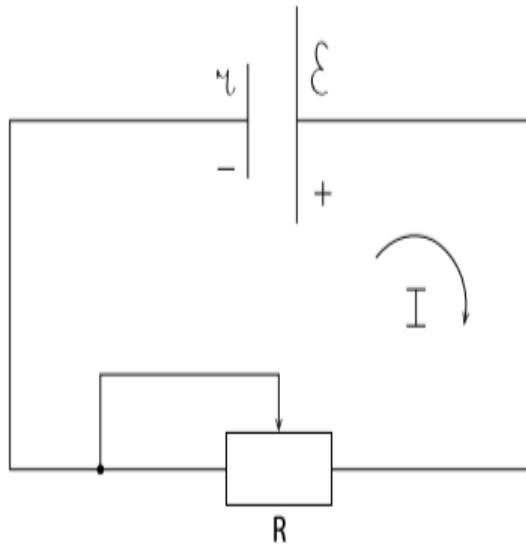


Рис.69

Вычислим зависимость КПД от сопротивления цепи и от тока.

$$\eta(R) = \frac{A_{\text{внеш}}}{A_{\text{ист}}} = \frac{P_{\text{внеш}}}{P_{\text{ист}}} = \frac{I(\varphi_1 - \varphi_2)}{\frac{\varepsilon}{\frac{R}{R+r}}} = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2)}{\varepsilon} = \frac{IR}{I(R+r)} =$$

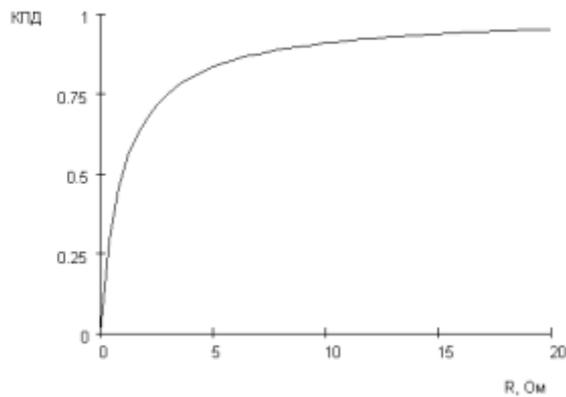


Рис.70. Зависимость КПД от сопротивления нагрузки,  
ЭДС=1В, r=1Ом

$$\eta(I) = \frac{I\xi - I^2r}{I\xi} = \frac{\xi - Ir}{\xi}$$

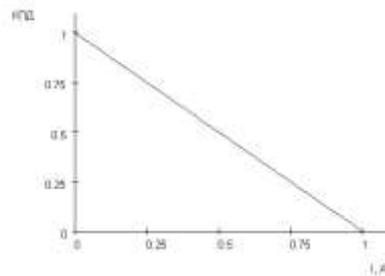


Рис.71. Зависимость КПД  $\eta$ , от тока в цепи I, ЭДС=1В,  
r=1Ом

### Электрический ток в металлах

**Природа электрического тока в металлах** - нужно ответить на вопрос: какие частицы являются носителями тока в металлах (в принципе это могут быть положительные

ионы, отрицательные ионы, электроны). Ответ на этот вопрос может быть получен только экспериментально.

**Классическая теория электропроводности (КТЭ)**

КТЭ рассматривает свободные электроны как некий газ (электронный газ) к которому можно применить приемы и методы расчетов, используемые в МКТ. Тогда средняя энергия одного электрона:  $K_{\text{ср}} = \frac{m\langle v \rangle^2}{2} = \frac{3}{2}kT = 0,04 \text{ эВ}$  ( $v = \sqrt{\frac{3kT}{2}} \approx 10^5 \text{ м/с}$ ,  $T = 300 \text{ К}$ ).

**Средняя длина свободного пробега  $l$**  - средняя величина пути, который проходит электрон между двумя последовательными столкновениями  $l = \frac{l_1 + l_2 + \dots + l_n}{n}$ .

**Среднее время пробега  $\tau$**  - средний интервал времени между двумя последовательными столкновениями  $\tau = \frac{l}{v}$ .

**Концентрация  $n$**  - число свободных электронов в единице объема металла.

### 3.5 МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ (МП)

**Магнитное поле** - это материальная среда, оно представляет собой одну из форм электромагнитного поля.

МП может быть обнаружено по следующим силовым воздействиям:

- 1) действию на магнитную стрелку;
- 2) на движущийся электрический заряд (электрическое поле действует как на движущийся, так и на неподвижный электрический заряд);
- 3) действию на проводник с током;
- 4) на рамку с током.

**Источники магнитного поля:**

- 1) постоянный магнит;
- 2) проводник с током;

3) движущийся электрический заряд (неподвижный электрический заряд создает в пространстве только электрическое поле, движущийся - создает и электрическое и магнитное поле);

4) магнитное поле может быть создано переменным электрическим полем.

#### Количественное описание магнитного поля

Т.к. МП оказывает ориентирующее действие на свободную рамку с током или магнитную стрелку, то отсюда можно сделать вывод, что в каждой точке МП характеризуется векторной физической величиной и эту физическую величину называют индукцией магнитного поля и обозначают  $\vec{B}$ . Направление вектора  $\vec{B}$  совпадает с направлением нормали  $\vec{n}$  к плоскости рамки с током в положении устойчивого равновесия (с конца вектора  $\vec{n}$  ток рамке должен казаться идущим против часовой стрелки).

Момент сил, действующих на рамку с током со стороны МП оказывается не зависящим от формы рамки. Момент оказывается пропорционален току в рамке и площади рамки ( $M \sim IS$ ), он зависит от взаимной ориентации рамки с током и магнитного поля, момент сил может принимать значения от 0 до  $M_{max} = BIS$ , 0 - соответствует положению устойчивого равновесия рамки (M и B параллельны),  $M_{max}$  соответствует условию  $\vec{M} \perp \vec{B}$ . Это выражение может быть использовано для экспериментального определения модуля индукции магнитного поля:

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

Единицы измерения индукции МП:  $[B] = \frac{[F][l]}{[I][l]^2} = 1 \frac{Н}{А \cdot м} = 1 \text{ Тесла.}$

Сила, действующая на проводник с током со стороны МП

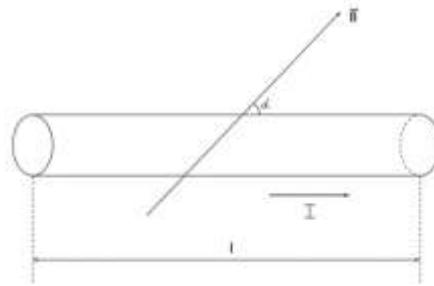


Рис.72. Сила Ампера

Пусть имеется однородное МП индукции  $\vec{B}$ , в поле находится прямолинейный проводник длины  $l$ , по которому протекает ток  $I$ , проводник образует с вектором индукции МП угол  $\alpha$ . Опыт показал, что в этом случае на проводник действует сила, величина которой определяется соотношением:

$F = BIl \sin \alpha$  (это соотношение может быть использовано для измерения индукции МП). Опыт показал, что эта сила перпендикулярна плоскости, которая определяется пересечением вектора  $\vec{B}$  и проводника. Для того, чтобы научиться правильно определять направление этой силы служит:

**Правило левой руки:** вектор индукции входит в ладонь, четыре пальца направлены по направлению тока, отогнутый большой палец указывает направление силы.

Понятие о векторном произведении

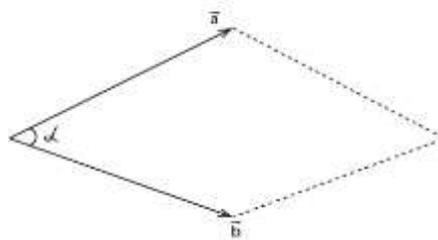


Рис.73. Векторное произведение

$$\vec{B} = [\vec{a}, \vec{b}] = \vec{a} \times \vec{b}$$

$$|\vec{B}| = ab \sin \alpha$$

Направление вектора  $\vec{B}$  перпендикулярно плоскости, задаваемой пересечением векторов  $\vec{a}$  и  $\vec{b}$ , так, что с его острия вращение от  $\vec{a}$  к  $\vec{b}$  происходит против часовой стрелки. Если множители поменять местами, то результат умножения изменяет свое направление на противоположное, т.е. операция векторного умножения не обладает принципом коммутативности.

Таким образом выражение для вычисления силы действующей на проводник с током в магнитном поле можно записать в виде:

$$\vec{F} = I[\vec{l}, \vec{B}]$$

эта сила называется **силой Ампера**.

Суперпозиция магнитных полей:

Если МП создано системой токов, то результирующее поле в каждой точке представляет собой векторную сумму полей, создаваемых в этой точке каждым током в отдельности.

Графическое изображение МП:

МП изображается с помощью линий магнитной индукции (МИ) которые обладают следующими свойствами:

- 1) в любой точке вектор магнитной индукции  $\vec{B}$  направлен по касательной к линии индукции, проходящей через эту точку;
- 2) линии индукции не пересекаются друг с другом;
- 3) линии индукции МП оказываются замкнутыми, что в природе не магнитных зарядов. (поля, которые описываются замкнутыми линиями напряженности или индукции называются вихревыми или соленоидальными, таким полям нельзя приписать энергетическую характеристику – потенциал  $\phi$ );

4) плотность линий индукции пропорциональна модулю индукции магнитного поля  $\vec{B}$ .

#### Магнитное поле движущегося заряда

Неподвижный электрический заряд создает в окружающем пространстве только электрическое (электростатическое) поле, которое для точечного заряда обладает сферической симметрией. Если заряд движется, то он создает как электрическое, так и магнитное поле. Т.к. магнитное поле связано с движением, то оно не будет обладать сферической симметрией, но оказывается оно будет обладать осевой симметрией, электрическое поле перестает обладать сферической симметрией, если скорость заряда соизмерима со скоростью света  $c$ .

#### Магнитное поле проводника с током

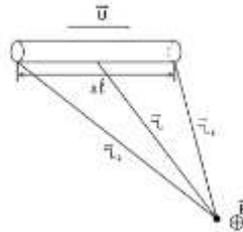


Рис.74. Магнитное поле проводника с током

$$r_1 \approx r_2 \approx r$$

$$\Delta l \ll |\vec{r}|$$

Пусть  $\vec{v}$  - скорость хаотического движения зарядов,  $\vec{u}$  - скорость упорядоченного (направленного) движения носителей,  $n$  - концентрация носителей в проводнике,  $nS\Delta l$  - число свободных носителей заряда в проводнике длины  $\Delta l$  и площади поперечного сечения  $S$ , тогда:

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q[\vec{u}, \vec{r}]}{r^3} nS\Delta l$$

$$(\vec{j}\Delta l = j\vec{\Delta l})$$

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{[j\vec{\Delta l}, \vec{r}]}{r^3} S = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I[\vec{\Delta l}, \vec{r}]}{r^3}$$

Закон Био-Савара-Лапласа:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I[\vec{\Delta l}, \vec{r}]}{r^3}$$

Частные виды полей

Магнитное поле прямолинейного проводника с током

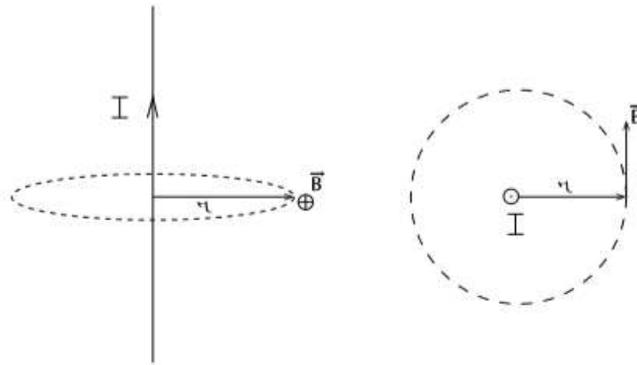


Рис.75. Магнитное поле прямолинейного проводника с током

Проводник бесконечно длинный, тонкий, прямолинейный.

Линии индукции представляют собой окружности с центром на оси проводника, лежащие на плоскости, перпендикулярной проводнику, направление линий индукции определяется по правилу правого винта (ось винта совпадает с направлением тока, а направление вращения с направлением линий индукции).

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \text{ - в вакууме,}$$

$$B = \frac{\mu_0 \mu I}{2\pi r} \text{ - в веществе,}$$

где  $\mu$  - **магнитная проницаемость вещества** - скалярная физическая величина, которая показывает, во сколько раз магнитное поле в веществе больше, чем поле того же тока в вакууме.

#### Магнитное поле кольца с током

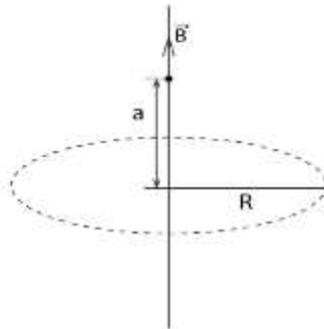


Рис.76. Магнитное поле кольца с током

$$B = \frac{\mu_0 IR}{4\pi R^3} \Delta l \sin \alpha = \frac{\mu_0 I}{4\pi R^2} (\Delta l_1 + \Delta l_2 + \dots + \Delta l_n) =$$

$$\frac{\mu_0 I \cdot 2\pi R}{4\pi R^2} = \frac{\mu_0 2P_M}{4\pi R^3} = \frac{\mu_0 2P_M}{4\pi (R^2 + a^2)^{3/2}},$$

$$B = \frac{\mu_0 2P_M}{4\pi (R^2 + a^2)^{3/2}}.$$

где  $P_M = IS$  - магнитный момент кольца с током.

#### Магнитное поле соленоида

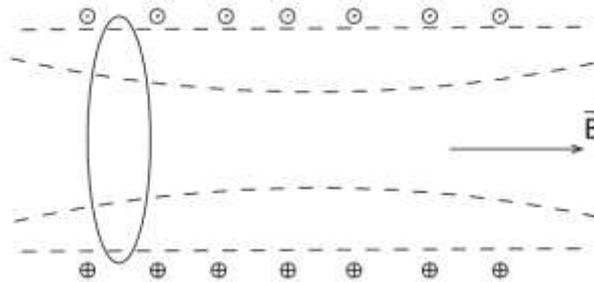


Рис.77. Магнитное поле соленоида

Параметры, характеризующие катушку:  $l$  - длина катушки,  $N$  - количество витков,  $\frac{N}{l} = n$  - количество витков на единицу длины.

$$B = \mu_0 n I$$

Взаимодействие двух параллельных проводников с током.

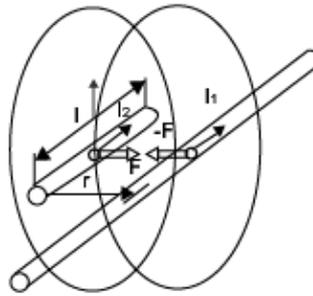


Рис.78. Взаимодействие двух параллельных проводников с током

Пусть имеется два бесконечно длинных прямолинейных проводника, параллельных друг другу и расположенных на расстоянии  $r$  друг от друга в однородном веществе.

Рисунок.

$F_A = B_1 I_2 l \sin \alpha$  - сила, действующая на второй проводник длины  $l$  со стороны магнитного поля, создаваемого первым проводником.

$F = \frac{\mu_0 \mu I_1 I_2 l}{2\pi r}$  - сила взаимодействия двух проводников.

Следовательно, сила взаимодействия двух проводников на единицу длины равна:

$$F_{\text{ед. дл}} = \frac{\mu_0 \mu I_1 I_2}{2\pi r}$$

Отсюда можем определить силу тока в 1 ампер следующим образом:

**1 ампер** - это сила такого тока, который протекая по двум бесконечно длинным, тонким, прямолинейным, параллельным друг другу проводникам, расположенным в вакууме на расстоянии 1 м друг от друга вызывает между проводниками силу взаимодействия  $2 \cdot 10^{-7}$  Н на 1 метр длины проводников. Это определение позволило произвести градуировку приборов для измерения силы тока и вычислить магнитную постоянную:

$$\mu_0 = \frac{2\pi RF}{\mu I_1 I_2 l} = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Н/А}^2.$$

Движение заряженных частиц в электрическом и магнитном полях.

На движущийся заряд со стороны магнитного поля действует сила, которая называется **силой Лоренца**, эта сила направлена перпендикулярно к плоскости, которая определяется векторами  $\vec{B}$  и  $\vec{v}$ , а направлена по правилу левой

руки (на рисунке сила направлена перпендикулярно плоскости чертежа, от нас), величина силы Лоренца определяется соотношением:  $F_L = qvB \sin \alpha$ , следовательно можно написать:

$$\vec{F}_L = q[\vec{v}, \vec{B}]$$

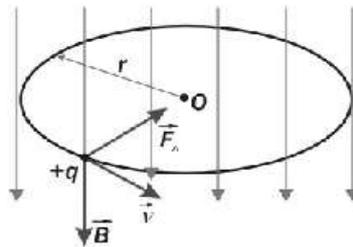


Рис. 79. Сила Лоренца

Так как сила Лоренца перпендикулярна скорости, то она не может изменить модуль скорости и кинетическую энергию частиц, сила Лоренца может изменить скорость лишь по направлению, что приводит к изменению траектории. Попробуем оценить возможные формы траектории:

1)  $\alpha=0$  или  $\alpha=\pi$

$F_L = 0$  (траектория прямолинейна);

2)  $\alpha = \frac{\pi}{2}$

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

$$m \frac{v^2}{r} = F_L$$

$$m \frac{v^2}{r} = qvB$$

$r = \frac{mv}{qB}$  - радиус окружности,

$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi m}{qB}$  - период обращения;

3)  $\alpha \neq 0$ ,  $\alpha \neq \pi$ ,  $\alpha \neq \frac{\pi}{2}$

$v_{\perp} = v \sin\alpha$ ,  $v_{\parallel} = v \cos\alpha$

$r = \frac{mv_{\perp}}{qB} = \frac{mv \sin\alpha}{qB}$  - радиус спирали,

$T = \frac{2\pi m}{qB}$  - период,

$h = T v_{\parallel} = \frac{2\pi m v \cos\alpha}{qB}$  - шаг спирали.

### Электронно-лучевая трубка

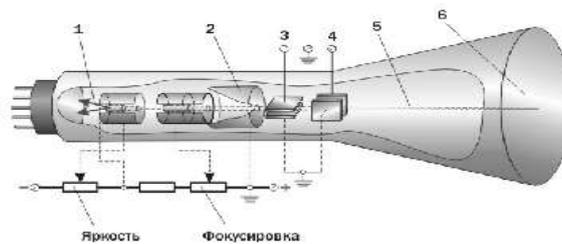


Рис.80. Схема электронно-лучевой трубки

Рассмотрим задачу о смещении частиц электрическим полем:

Движение электрона внутри конденсатора равноускоренное, т.к. на него действует только электрическая сила, величина которой не меняется внутри конденсатора:

$$m\vec{a} = \vec{F}_{\text{эл}}$$

$$F_{\text{эл}} = qE = q \frac{U}{d}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} a_x = 0, \\ a_y = \frac{qU}{md}, \\ v_x = v, \\ v_y = at, \\ l_1 = vt_1, \\ y_1 = \frac{at^2}{2}; \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} t_1 = \frac{v}{l_1}, \\ y_1 = \frac{qUl_1^2}{2mdv^2}, \\ tg\alpha = \frac{v_y}{v_x} = \frac{qUl_1}{mdv^2}; \end{array} \right.$$

по вылете из конденсатора электрон движется равномерно и прямолинейно, т.к. на него не действуют никакие силы (действием сил гравитации на элементарные частицы можно пренебречь):

$$y_2 = l_2 tg\alpha$$

следовательно:

$$y = y_1 + y_2 = \frac{qUl_1^2}{2mdv^2} + \frac{qUl_1l_2}{mdv^2} = \frac{qUl_1}{2mdv^2} (l_1 + 2l_2)$$

### 3.6 ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

**Электромагнитная индукция (ЭМИ)** - это явление, суть которого заключается в следующем: изменяющееся со временем магнитное поле создает в пространстве электрическое поле. Это электрическое поле по своей структуре и свойствам отличается от электрического поля, создаваемого зарядом (от электростатического поля). Линии напряженности этого электрического поля оказываются замкнутыми, работа

сил этого электрического поля по замкнутому контуру не равна нулю ( $A_{\text{вихр}} \neq 0$ ), т.е. поле не является потенциальным. Для того, чтобы отличать это поле от электростатического его называют **вихревым электрическим полем**.

Явление ЭМИ было обнаружено Фарадеем. Суть опытов Фарадея заключалась в том, что исследовались условия возникновения электрического тока в замкнутом контуре, не содержащем источников тока. Опыты Фарадея показали, что

ток в контуре наблюдается в следующих случаях:

- 1) имеет место относительное движение контура и постоянного магнита;
- 2) имеет место относительное движение контура и электромагнита;
- 3) электромагнит неподвижен, а ток в контуре возникает при замыкании и размыкании магнита;
- 4) электромагнит неподвижен относительно контура, относительно контура движется ферромагнетик (железный сердечник) - т.е. меняются магнитные свойства вещества, в котором расположен контур.

Опыты Фарадея, позволили сделать вывод, что индукционный ток в замкнутом контуре возникает лишь в том случае, если изменяется поток магнитной индукции через площадь контура.

#### **Поток вектора индукции магнитного поля**

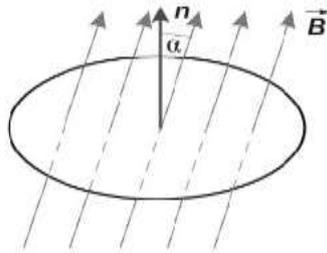


Рис.81 Поток вектора индукции магнитной индукции

$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S} = BS \cos(\vec{B}, \vec{n})$  - в случае, если контур плоский и вектор,

$\Phi = B \sum_i \Delta S_i \cos \alpha_i$  - в общем случае.

Величина **индукционного тока** (т.е. тока, который появляется в замкнутом контуре за счет действия МП) оказывается пропорциональна скорости изменения магнитного потока через площадь контура

$$I_{\text{инд}} \sim \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

Направление индукционного тока меняется в зависимости от того возрастает магнитный поток или убывает, индукционный ток в замкнутом контуре направлен так, чтобы его собственное магнитное поле, возникающее в результате протекания этого тока, противодействовало изменению магнитного потока, вызвавшего этот ток. Это утверждение является обобщением экспериментальных результатов и называется **правилом Ленца**. Правило Ленца является следствием закона сохранения энергии.

Закон электромагнитной индукции удобно записывать не для тока, а для ЭДС индукции (ток неудобен, т.к. его величина определяется не только свойствами вихревого электромагнитного поля, но и свойствами проводника: длиной, толщиной, температурой и т.д.)

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

Знак " - " учитывает правило Ленца.

$$\mathcal{E}_{\text{инд}} = \frac{A_{\text{вихр эл поле}}}{q}.$$

Если в переменное магнитное поле внести массивный проводник, то вихревое электрическое поле создаст в толще этого проводника вихревые токи, которые называются **токами Фуко**. Токи Фуко приводят к разогреву проводника, это явление используется для разогрева и плавления электропроводящих материалов (индукционные плавильные печи). В некоторых случаях токи Фуко оказываются нежелатель-

ными, например в сердечниках трансформаторов, т.к. приводят к дополнительным потерям энергии. В этом случае стремятся понизить электропроводность материалов: либо делают сердечники из непроводящих ферромагнитных материалов (ферриты), либо из тонких стальных пластин, электрически изолированных друг от друга.

ЭДС индукции в движущемся прямолинейном проводнике.

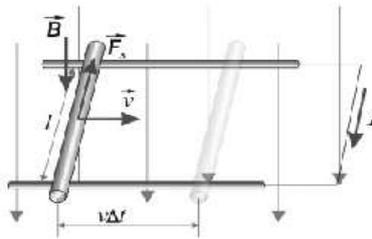


Рис.82. ЭДС индукции в движущемся прямолинейном проводнике

Пусть имеется **постоянное** магнитное поле, в котором движется проводник длиной  $l$ , опыт показывает, что на концах такого проводника возникает разность потенциалов, т.е. в проводнике возникает ЭДС индукции, но так как магнитное поле постоянное, то вихревого электрического поля нет. Что же является причиной появления ЭДС индукции?

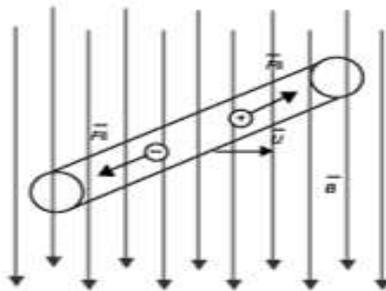


Рис.83

$$F_{\parallel} = F_{\perp} \sin \alpha = qvB \sin \alpha = qvB$$

$$\varepsilon_{\text{инд}} = Blv$$

Причиной появления ЭДС индукции в движущемся проводнике является не вихревое электрическое поле, а действие силы Лоренца, однако и в этом случае закон электромагнитной индукции оказывается справедливым.

В общем случае:

$$\varepsilon_{\text{инд}} = Blv \sin(\vec{v}, \vec{l}) \sin(\vec{B}, \vec{l}) \sin(\vec{B}, \vec{v})$$

#### Самоиндукция

**Собственный магнитный поток** - это поток магнитной индукции, создаваемый током в самом контуре, т.к. индукция магнитного поля в любой точке пропорциональна току в контуре, то  $\Phi_c \sim I$  или  $\Phi_c = LI$ , где  $L$  - **индуктивность контура** или коэффициент самоиндукции.

Индуктивность зависит от формы и размеров контура, от магнитных свойств вещества, заполняющего контур, а от величины тока индукция непосредственно не зависит.

#### ЭДС самоиндукции

Используя закон электромагнитной индукции получаем:

$$\varepsilon_{\text{с и}} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{(\Delta LI)}{\Delta t}$$

Если индуктивность контура не изменяется и поток изменяется лишь за счет изменения тока, то:

$$\varepsilon_{\text{с и}} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

В системе единиц СИ за единицу индуктивности принимают индуктивность такого проводника, в котором возникает ЭДС индукции равная 1 В, если ток в нем меняется со скоростью 1 А за 1 с, эту единицу называют **Генри**.

$$[L] = \frac{[\varphi][t]}{[I]} = \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{А}} = \text{Гн} = \frac{\text{Тл} \cdot \text{м}^2}{\text{А}}$$

$$[\Phi] = \text{Тл} \cdot \text{м}^2 = \text{В} \cdot \text{с} = (\text{Вебер}).$$

### Энергия магнитного поля тока

При замыкании цепи, когда ток начинает возрастать, возникает ЭДС самоиндукции направленная против ЭДС источника. Для того, чтобы ток достиг определенной величины  $\mathcal{E}/R$  источник должен совершить работу против сил вихревого поля. Энергия источника при этом затрачивается на увеличение энергии магнитного поля тока. При установившемся токе ЭДС самоиндукции равна нулю, энергия магнитного поля тока не изменяется, и энергия, расходуемая источником тока, превращается в тепловую энергию проводников. При размыкании цепи ток должен уменьшаться до нуля, и энергия магнитного поля должна превращаться в другие виды энергии. При этом возможно проскакивание искры в ключе.

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

### 3.7 ПОЛУПРОВОДНИКИ

Различают кристаллические (германий Ge, кремний Si) и аморфные тонкие пленки (селен). Полупроводники по внешнему виду напоминают металлы (т.е. обладают значительной прочностью, металлическим блеском, и чтобы отличить их от металлов, необходимо измерить зависимость удельного сопротивления от температуры).

Кристаллическая структура проводника. Рассмотрим, например, кремний:

Рисунок.

Атомы кремния имеют 4 валентных электрона в кристаллической решетке, все 4 электрона используются для создания ковалентных связей с соседними атомами, свободных электронов нет. Такая структура-имеет место при очень низкой температуре и полупроводник, в этом случае, ведет себя как диэлектрик (изолятор).

### Собственная проводимость полупроводников

С ростом температуры увеличивается энергия теплового движения атомов, увеличивается вероятное значение тепловых флуктуаций и часть электронов может освободиться. На месте освободившегося электрона образуется область не скомпенсированного положительного заряда, эту область называют электронной вакансией или дыркой. Процесс возврата электрона на вакансию называется рекомбинацией электрона и дырки. В чистых полупроводниках концентрация свободных электронов совпадает с концентрацией дырок и при комнатной температуре составляет  $10^{18} \text{ Г/см}^2$ . Во внешнем электрическом поле полупроводники в этом случае обладают электропроводимостью, которая обусловлена двумя процессами: 1) движением свободных электронов под действием внешнего электрического поля, электропроводимость, обусловленная движением свободных электронов называется **проводимостью n типа**; 2) движением валентных (связанных) электронов по вакансиям, это движение обычно рассматривают (математическое описание), как движение положительных частиц - дырок, которым приписывается фиктивная масса и фиктивный заряд, этот тип проводимости называется **проводимостью p типа**.

### Примесная полупроводимость

**Примесью** считаются вещества, валентность которых отличается от валентности исходного вещества.

Введем в кристаллическую решетку кремния Si примесные атомы мышьяка As. Примесные атомы заменяют атомы кремния, при этом четыре из пяти валентных электрона мышьяка участвуют в ковалентных связях с соседними атомами кремния, пятый электрон для создания ковалентных связей не используется, он оказывается слабо связан с атомом мышьяка и при сравнительно небольшой температуре порядка 100 К становится свободным, при этом появление свободного электрона не сопровождается появлением дырки,

проводимость в этом случае обусловлена только лишь электронами, т.е. это будет проводимость n типа, соответственно примесь называется донорской. Допустим, что концентрация примеси составляет  $10^{-6} \div 10^{17} \text{ ат/см}^3$ , в этом случае, проводимость, обусловленная примесью в  $10^3$  раз, превышает проводимость самого вещества.

Если в кристаллическую решетку кремния ввести примесь трехвалентного вещества, например индия In, то атомы индия замещают некоторые из атомов кремния в узлах кристаллической решетки, образуя одну незаполненную вакансию (дырку), концентрация дырок оказывается равна концентрации индия, свободные электроны при этом не образуются. Введение примеси в полупроводник называется легированием полупроводника.

#### Контакт полупроводников n и p типа, p-n переход Применение полупроводников

- 1) Терморезистор - используется зависимость сопротивления от температуры.
- 2) Фоторезистор - используется зависимость сопротивления от свойств полупроводника, могут быть для измерения характеристик систем и процессов и для управления процессами.
- 3) Полупроводниковый диод - для выпрямления переменного тока.
- 4) Транзистор - полупроводниковый прибор, управляющий большими токами с помощью малых потенциалов.

#### Электрический ток в вакууме

Вакуум не проводит электрический ток, т.к. нет свободных носителей. Свободные носители появляются за счет выхода электронов из металлического электрода.

Для того, чтобы электрон мог покинуть металл, т.е. уда-

литься от него бесконечно далеко, он должен обладать достаточной энергией, и эта энергия должна превышать величину, которая называется **работа выхода** электрона из металла  $A_{\text{вых}}$ .

Схема для наблюдения термоэлектронной эмиссии

Cu: 4,1 эВ,

Na: 1,9 эВ.

Необходимую энергию электрон может приобрести при нагреве вещества, или при его облучении светом.

**Термоэлектронная эмиссия** - это явление, заключающееся в выходе электронов из металла при нагревании, с ростом температуры вещества увеличивается средняя энергия теплового движения электронов и увеличивается доля электронов, энергия которых превышает работу выхода  $A_{\text{вых}}$ .

$$\eta = \frac{S_{\text{Авых}}}{S_0}$$

При токе насыщения все носители, которые испускает катод  $K^-$  достигают анода  $A^+$ , ток насыщения увеличивается лишь в том случае, если увеличить число носителей, испускаемых катодом в единицу времени (например, за счет повышения температуры катода).

**Фотоэффект** - явление выхода электронов из вещества при облучении его светом.

#### Электрический ток в электролитах

**Электролиты** - это вещества водные растворы и расплавы которых обладают ионной проводимостью. Электролитами являются соли, неорганические кислоты, щелочи (водные растворы некоторых веществ не являются электролитами).

Электрический ток в электролитах обусловлен движением положительных и отрицательных ионов, образованных в процессе электролитической диссоциации.

**Электролитическая диссоциация** - это процесс распада нейтральных молекул на ионы под действием раство-

рителя, одновременно в растворе происходит обратный процесс - рекомбинация ионов с образованием нейтральных молекул.

Положительные ионы электролитов, которые движутся при протекании тока к катоду  $K^-$  - называются **катионы**, а отрицательные - которые движутся к аноду  $A^+$  - **анионы**.

К электролитам применим закон Ома:

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

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

Удельное сопротивление электролитов с ростом температуры уменьшается, это обусловлено тем, что с ростом температуры облегчается диссоциация молекул на ионы, что приводит к росту концентрации свободных носителей зарядов.

**Электролиз** - это процесс выделения вещества на электродах при протекании через электролит электрического тока (это явление обнаружено Фарадеем 1832 г.), явление электролиза обусловлено протеканием окислительно-восстановительных реакций на электродах.

Процесс пропускания тока через электролит сопровождается переносом меди с анода на катод, медный анод растворяется, количество вещества, выделившееся на электроде пропорционально заряду, прошедшему через электролит:

$$m = kq = kIt$$

коэффициент пропорциональности  $k$  является характеристикой вещества и называется электрохимическим эквивалентом, электрохимический эквивалент вещества пропорционален его химическому эквиваленту  $k = \frac{1}{F} \chi = \frac{1}{F} \frac{A}{n}$  где  $\frac{1}{F}$  - одна и та же для всех веществ и называется **число Фарадея**,

$$m = \frac{1}{F} \frac{A}{n} q = \frac{1}{F} \frac{A}{n} It$$

### Применение электролиза

1) Электрометаллургия - получение металла из расплава

руд.

- 2) Очистка (рафинирование) меди.
- 3) Нанесение покрытий.
- 4) Электрополировка.
- 5) Гальванопластика - получение рельефных профилей.

## 4. КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

### 4.1. МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

#### Кинематика колебательных движений

**Колебания** - любые повторяющиеся процессы.

**Периодические колебания** - колебания, в которых каждый цикл воспроизводит в точности любой другой цикл.  
 $f(t) = f(t + T)$ .

**Период колебаний** ( $T$ ) - минимальный промежуток времени, через который цикл повторяется.

**Частота колебаний** ( $\nu$ ) - число колебаний в единицу времени,  $\nu = \frac{1}{T}$  ( $c^{-1}$ ) Гц.

**Круговая частота** ( $\omega$ )  $\omega = 2\pi\nu$  ( $c^{-1}$ ).

**Гармонические колебания** - колебания при которых изменение, со временем, физической величины, их описывающей происходит по закону синуса или косинуса.

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

где  $A$  - амплитуда колебаний,  $\omega t + \varphi_0$  - фаза колебаний,  $\varphi_0$  - начальная фаза.

**Амплитуда колебаний** - максимальное значение физической величины, изменяющейся по гармоническому закону.

**Фаза колебаний** - значение аргумента  $\cos$  или  $\sin$ , в законе изменения физической величины,  $\varphi(t) = \omega t + \varphi_0$ .

$\varphi_0$  - начальная фаза.

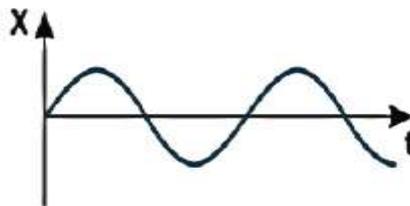


Рис.84. Гармонические колебания

**Свободные колебания** - колебания, происходящие в системе, выведенной из положения равновесия без воздействия внешних периодических сил.

**Вынужденные колебания** - колебания, происходящие под воздействием внешних сил.

Равномерное движение по окружности, как колебательный процесс

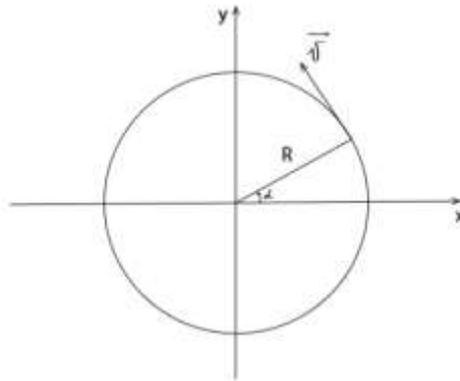


Рис.85. Равномерное движение по окружности

$$\alpha(t) = \omega t$$

$$x(t) = R \cos \alpha(t) = R \cos(\omega t)$$

$$y(t) = R \sin \alpha(t) = R \sin(\omega t) = R \cos\left(\frac{\pi}{2} - \omega t\right) \\ = R \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

$$v_x = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{dx}{dt}$$

$$v_x(t) = -R\omega \sin(\omega t) = \omega R \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$$

$$v_y(t) = R\omega \cos(\omega t)$$

$$a_x(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v_x}{\Delta t} = \frac{dv_x}{dt} = -\omega^2 R \cos(\omega t) = -\omega^2 x(t)$$

$$a_y(t) = -\omega^2 y(t)$$

Собственные колебания пружинного маятника

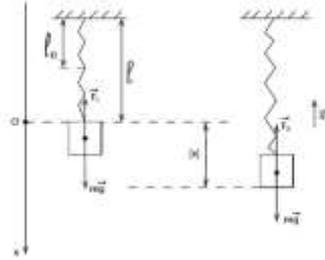


Рис.86. Колебания пружинного маятника

$l_0$  - длина нерастянутой пружины,  $l$  - длина пружины в состоянии равновесия.

1) состояние равновесия:  $mg = k(l - l_0)$ .

2) выведем пружину из состояния равновесия.

$$m\vec{a} = \vec{F}_2 + m\vec{g}$$

$$F_{2x} = -k(l - l_0 + x)$$

$$ma_x = mg - kx - k(l - l_0)$$

$$a_x = -\frac{k}{m}x = -\omega^2 x$$

$$\omega^2 = \frac{k}{m}; \quad \omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$\vartheta = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}; \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

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

$$x(0) = a; \quad v_x(0) = 0$$

$$A \cos \varphi_0 = a; \quad -A\omega \sin \varphi_0 = 0$$

$$\Rightarrow A = a$$

Найдем кинетическую и потенциальную энергию ( $a$  - максимальное смещение груза из положения равновесия):

$$K = \frac{mv_x^2}{2} = \frac{ma^2\omega^2}{2} \cos^2\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$$

$$v_x(t) = -a\omega \sin \omega t = a\omega \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$$

$$\Pi = \frac{kx^2}{2} = \frac{ka^2}{2} \cos^2(\omega t)$$

$$\Pi_{max} = K_{max} = \frac{ka^2}{2} = \frac{m\omega^2 a^2}{2}$$

$$K + \Pi = \frac{ka^2}{2}$$

Собственные колебания математического маятника.

**Математический маятник** - система, состоящая из нерастяжимой, длинной, невесомой нити и материальной точки, подвешенной на конце нити.

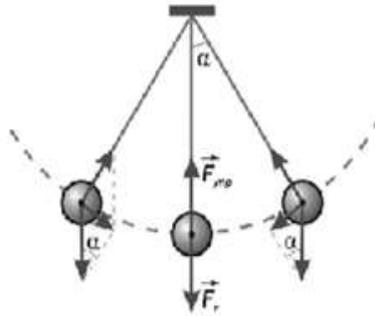


Рис.87. Колебания математического маятника

Квазиупругие силы - силы любой природы, для которых справедливо соотношение:  $F_x = -kx$ , а следовательно  $a_x = -\omega^2 x$

$$m\vec{g} + \vec{T} = m\vec{a}$$

$$ma_\tau = -mg \sin \alpha$$

$$a_\tau = -\frac{g}{l} S$$

$$\omega^2 = \frac{g}{l}; \omega = \sqrt{\frac{g}{l}}$$

$$\vartheta = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}}; T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

$$R_\tau = -\frac{mg}{l} S; \Pi = \frac{kx^2}{2}$$

$$\Pi = mg(l-h) = \frac{mg(l-h)(l+h)}{l+h} = mg \frac{l^2-h^2}{l+h} = mg \frac{x^2}{2l} =$$

$$\frac{1}{2} \frac{mg}{l} x^2$$

Задача 1. Два тела массами  $m_1$  и  $m_2$  связаны пружиной жесткости  $k$  и лежат на гладком горизонтальном столе. Найти период собственных колебаний системы.

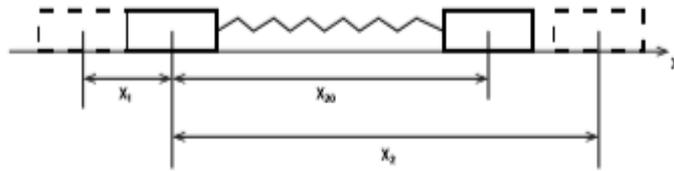


Рис.88. К задаче 1

Каждое из тел будет совершать колебания вокруг общего центра масс, рассмотрим первое тело, выведенное из состояния равновесия:

$m_1 a_{1x} = k(x_2 - x_1 - x_{20})$ , знаки в выражении учитывают следующее:

$$x_1 < 0, x_2 > 0, x_{20} > 0$$

$$X_C = \frac{m_2 x_{20}}{m_1 + m_2} = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2}{m_1 + m_2},$$

$$x_2 = x_{20} - \frac{m_1}{m_2} x_1,$$

$$m_1 a_{1x} = k \left( x_{20} - \frac{m_1}{m_2} x_1 - x_1 - x_{20} \right) = -k \frac{m_1 + m_2}{m_2} x_1,$$

$$\ddot{x} + k \frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2} x_1 = 0,$$

$$\omega = \sqrt{k \frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2}}, T = \sqrt{\frac{k m_1 m_2}{m_1 + m_2}}.$$

**Задача 2.** Тело массы  $M$  под действием пружины совершает колебания с амплитудой  $A_0$  на гладком горизонтальном столе, в момент, когда тело проходит положение равновесия сверху падает кусок пластилина массы  $m$ . Как изменится амплитуда  $A$ ?

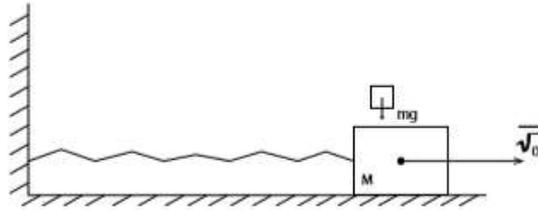


Рис.89. К задаче 2

$$\begin{aligned}
 Mv_0 &= (M + m)v_1 \\
 \frac{Mv_0^2}{2} &= \frac{kA_0^2}{2} \\
 \frac{(M + m)v_1^2}{2} &= \frac{kA_1^2}{2} \\
 A_1 &= \sqrt{\frac{M + m}{k}} \\
 v_1 &= \frac{M}{M + m}v_0 \\
 v_0 &= \sqrt{\frac{k}{M}}A_0 \\
 A_1 &= \sqrt{\frac{M}{M + m}}A_0
 \end{aligned}$$

**Задача 3.** Математический маятник колеблется в кабине лифта, движущейся с ускорением  $\vec{a}$ . Чему равен период колебаний маятника?

$$m\vec{a}_n = m\vec{g} + \vec{T},$$

$$\vec{a}_n = \vec{a} + \vec{a}_{\text{отн}},$$

$$m\vec{a} + m\vec{a}_{\text{отн}} = m\vec{g} + \vec{T},$$

$$m(\vec{g} - \vec{a}) + \vec{T} = m\vec{a}_{\text{отн}},$$

$$\omega_a = \sqrt{\frac{|\vec{g} - \vec{a}|}{l}},$$

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{l}} \text{ - по аналогии с математическим маятником без}$$

ускорения.

Сложение гармонических колебаний

$$x_1(t) = A_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_1),$$

$$x_2(t) = A_2 \cos(\omega_2 t + \varphi_2),$$

Если  $\omega_1 = \omega_2 = \omega$  то, в результате сложения колебаний получаются гармонические колебания:

$$x(t) = A \cos(\omega t + \varphi), \text{ где}$$

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1)}, \text{ tg } \varphi = \frac{A_1 \sin \varphi_1 + A_2 \sin \varphi_2}{A_1 \cos \varphi_1 + A_2 \cos \varphi_2}$$

$$\text{при } \varphi_2 - \varphi_1 = 0, A = A_1 + A_2,$$

$$\text{при } \varphi_2 - \varphi_1 = \pi, A = |A_1 - A_2|.$$

Сложение гармонических колебаний, происходящих в перпендикулярных плоскостях

$$x(t) = A \cos \omega_1 t, \quad y(t) = B \sin \omega_2 t,$$

при разных соотношениях частоты получаются фигуры Лиссажу:

Если  $\omega_1 = \omega_2 = \omega$  то:

$$\frac{x^2}{A^2} = \cos^2 \omega t, \quad \frac{y^2}{B^2} = \sin^2 \omega t.$$

$$\frac{x^2}{A^2} + \frac{y^2}{B^2} = 1 \text{ - эллипс.}$$

Затухающие колебания.

**Затухающие колебания** - колебания при наличии сил

сопротивления,  $\beta$  - коэффициент затухания.

Рисунок.

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

$$A(t) = A_0 e^{-\beta t},$$

$$e = 2,718.$$

Вынужденные колебания. Резонанс

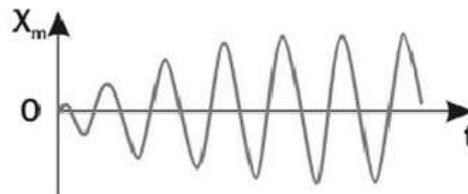


Рис.90. Вынужденные колебания

Частота вынужденных колебаний системы совпадает с частотой вынуждающей силы.

Амплитуда вынужденных колебаний пропорциональна амплитуде вынуждающей силы.

**Резонанс** - резкое возрастание амплитуды колебаний при совпадении собственной частоты колебаний и частоты вынуждающей силы. (возрастание амплитуды колебаний при резонансе выражается тем сильнее, чем меньше трение в системе).

Важнейшей характеристикой колебательной системы является зависимость амплитуды колебаний от частоты вынуждающей силы (АЧХ)

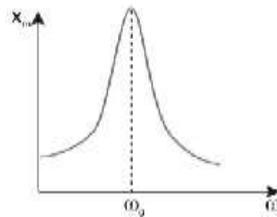


Рис.90. Резонанс

## 4.2 ВОЛНЫ

**Волны** - колебания, распространяющиеся в пространстве с течением времени.

**Механические волны** - волны, распространяющиеся в среде и приводящие к колебаниям некоторых характеристик этой среды (распространяются только в упругой среде).

Важнейшей характеристикой является скорость распространения волны, волны любой природы обладают конечной скоростью. При распространении механической волны движение передается от одного участка к другому, с передачей движения связана передача энергии, энергия складывается из кинетической энергии движения и потенциальной энергии упругой деформации. Постепенное уменьшение амплитуды связано с превращением части механической энергии во внутреннюю.

**Длина волны** ( $\lambda$ ) - расстояние на которое распространяется волна за время равное периоду колебаний.

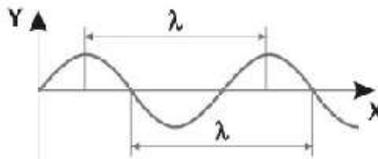


Рис.91. Длина волны

$$\lambda = v T, T = \frac{v}{\vartheta}, \text{ где } v - \text{ это скорость,}$$

**Поперечные волны** - волны, в которых колебания происходят перпендикулярно направлению распространения волны.

**Продольные волны** - волны, в которых направление распространения и колебания совпадают.

В твердых телах скорость продольных волн превышает

скорость поперечных.

**Интенсивность** - отношение энергии ( $\Delta W$ ), перенесенной через площадку, перпендикулярную направлению распространения, к площади этой площадки ( $\Delta S$ ) и промежутку времени ( $\Delta t$ ), за который происходит этот перенос.

$$J = \frac{\Delta W}{\Delta S \Delta t} = \beta A^2 \text{ где } A - \text{ амплитуда волны, } \beta -$$

константа.

**Волновая поверхность** - геометрическое место точек, в которых колебания происходят в одной фазе.

Граничная волновая поверхность, за которой колебаний еще нет, называется **фронтом волны**.

**Плоская, сферическая, цилиндрическая** волны - волны, имеющие соответствующую волновую поверхность.

**Уравнение плоской волны:**  $\xi(t, v) = A \cos \omega(t - \tau) = A \cos 2\pi(\nu t - \frac{x}{\lambda})$

#### Дифракция и интерференция волн

**Интерференция волн** - явление перераспределения интенсивности, при сложении двух и более когерентных волн.

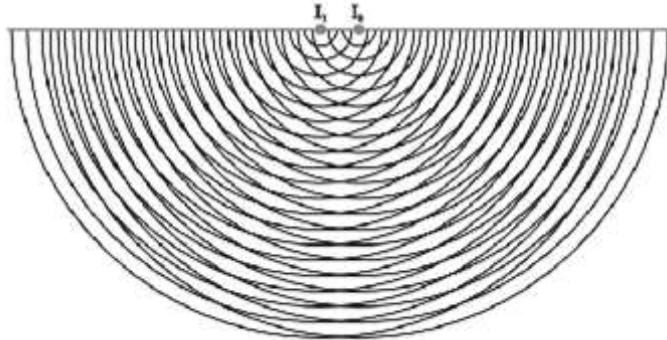


Рис.92. Интерференция волн

**Когерентные волны** - волны с одинаковой частотой и не меняющейся со временем разностью фаз.

$$\xi_1(t_1, v_1) = A_1 \cos 2\pi\left(\vartheta t - \frac{x_1}{\lambda}\right)$$

$$\xi_2(t_2, v_2) = A_2 \cos 2\pi\left(\vartheta t - \frac{x_2}{\lambda}\right)$$

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)$$

$$\varphi_1 - \varphi_2 = 2\pi \frac{x_2 - x_1}{\lambda}$$

$d = |x_2 - x_1|$  - оптическая разность хода.

Амплитуда колебаний среды в данной точке максимальна, если оптическая разность хода двух когерентных волн, возбуждающих колебания в этой точке, равна целому числу длин волн:  $d = 2m \frac{\lambda}{2}$  где  $m$  - целое число, т.е.  $m \in \mathbb{Z}$  и в этом случае  $A = A_1 + A_2$

Амплитуда колебаний среды в данной точке минимальна, если оптическая разность хода двух когерентных волн, возбуждающих колебания в этой точке, равна нечетному числу половолн:  $d = 2m + 1$

**Дифракция** - явление огибания волнами препятствий.

**Звуковые волны** - колебания плотности вещества, распространяющиеся в жидком, твердом и газообразном веществе (скорость звука в воздухе:  $v_{\text{возд}} \approx 340$  м/с, в воде  $v_{\text{вод}} \approx 500$  м/с, в стали  $v_{\text{стали}} \approx 5000$  м/с, частота звука, улавливаемая человеческим ухом  $\vartheta = 20 \div 20000$  Гц).

#### 4.3. ПЕРЕМЕННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

Генератор переменного тока

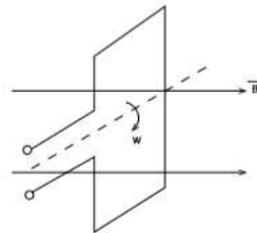


Рис.93. Генератор переменного тока

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

$$\varepsilon_i = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = - \frac{d\Phi}{dt}; e_r(t) = BS\omega \sin \omega t$$

Активное сопротивление цепи переменного тока.

**Активным** называется сопротивление проводника или резистора с малой индуктивностью.

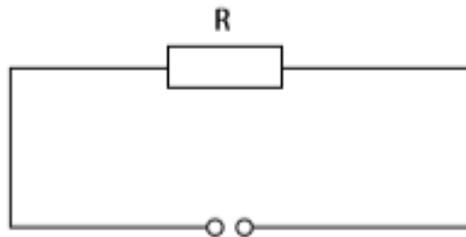


Рис.94. Активное сопротивление цепи переменного тока

$$u(t) = U_m \cos \omega t,$$

$$i(t) = \frac{u(t)}{R} = \frac{U_m}{R} \cos \omega t,$$

Колебания силы тока и напряжения на активном сопротивлении происходят в одинаковой фазе, а между амплитудами есть связь:

$$U_m = I_m R$$

Действующее значение силы тока и напряжения.

Для постоянного тока:  $P = I^2 R$

При переменном токе мгновенная мощность зависит от времени:

$$\langle P(t) \rangle = \langle i^2(t)R \rangle = \langle I_m^2 R \cos^2(\omega t) \rangle$$

$$= \frac{1}{2} I_m^2 R \langle 1 + \cos 2\omega t \rangle$$

$$I_d^2 = \frac{1}{2} I_m^2$$

$$I_d = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

$$P = \langle i^2(t) \rangle R = I_d^2 R$$

$$I_d^2 = \langle i^2(t) \rangle$$

**Действующее значение силы переменного тока** есть величина, квадрат которой равен среднему значению квадрата мгновенной силы тока.

Емкость в цепи переменного тока

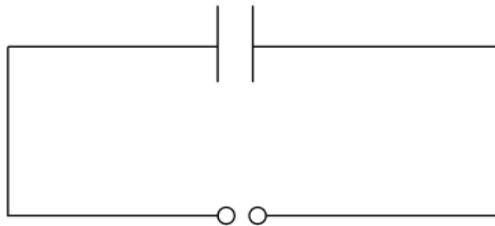


Рис.95. Емкость в цепи переменного тока

$$U(t) = U_m \cos \omega t,$$

$$q(t) = CU(t),$$

$$i(t) = \frac{dq}{dt} = -C\omega U_m \sin \omega t = \omega C U_m \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right).$$

Колебания силы тока опережают колебания напряжения на емкости на  $\frac{\pi}{2}$ , а амплитуда силы тока связана с амплитудой напряжения, как:  $J_m = C\omega U_m$

$$X_c = \frac{1}{\omega C} - \text{реактивное емкостное сопротивление.}$$

**Реактивное сопротивление** - часть периода энергию потребляет, а другую - отдает, таким образом, оно энергии не потребляет.

Индуктивность в цепи переменного тока.

$$u(t) = U_m \cos \omega t,$$

$$e_s(t) + u(t) = 0,$$

$$u(t) = -e_s(t) = L \frac{di}{dt} = -LI_m \omega \sin \omega t = LI_m \omega \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right),$$

$$i(t) = I_m \cos \omega t.$$

Колебания силы тока, идущего через индуктивность, отстают по фазе от колебаний напряжения на  $\frac{\pi}{2}$ , а амплитуды силы тока и напряжения связаны соотношением:  $U_m = L\omega I_m$   
 $X_L = \omega L$  - реактивное индуктивное сопротивление.

Принцип векторных диаграмм

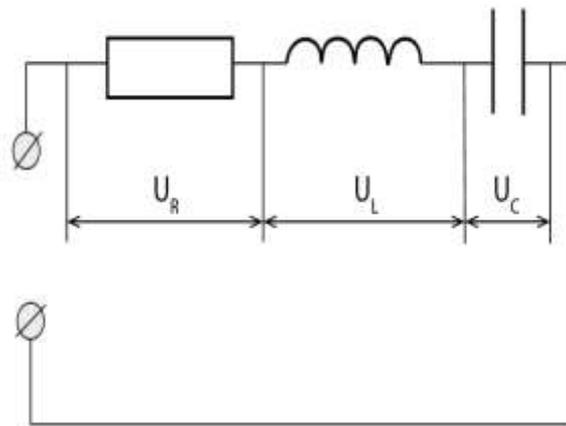


Рис. 96. Последовательный контур

$$u(t) = U_m \cos \omega t,$$

$$u(t) = u_R(t) + u_C(t) + u_L(t)$$

т.к. все три прибора: сопротивление  $R$ , конденсатор  $C$  и катушка индуктивности  $L$ , включены последовательно, то через них течет одинаковый ток, с частотой  $\omega$ , а зависимость напряжений от времени описывается следующими соотношениями:

$$u_R(t) = I_m R \cos \omega t$$

$$u_C(t) = \frac{I_m}{\omega C} \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

$$u_L(t) = I_m \omega L \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$$

Каждый из описанных выше колебательных процессов можно представить, как равномерное вращение соответствующего вектора по длине равной амплитуде колебаний, с угловой скоростью равной собственной частоте колебаний (см. равномерное вращение МТ по окружности, как колебательный процесс). Т.к. все три вектора  $U_R, U_L, U_C$  а также вектор  $U_m$  вращаются с одинаковой угловой скоростью, то для любого момента времени можно нарисовать следующую векторную диаграмму:

Рисунок.

Тогда зависимость тока от времени можно представить, как:

$i(t) = I_m \cos(\omega t + \varphi)$  где амплитуду тока  $I_m$  и задержку по фазе  $\varphi$  вычислим из следующих соображений:

$$U_m = \sqrt{U_R^2 + (U_C - U_L)^2} = \sqrt{I_m^2 R^2 + \left(\frac{I_m}{\omega C} - I_m \omega L\right)^2}$$

$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L\right)^2}}$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{U_C - U_L}{U_R} = \frac{\frac{1}{\omega C} - \omega L}{R}$$

Видно, что амплитуда тока  $I_m$  и задержка по фазе  $\varphi$  зависят от частоты источника  $\omega$  т.о. можно вычислить  $I_m$  при которой амплитуда тока будет иметь максимальное значение, это явление называется резонансом тока:

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \Rightarrow \omega_{\text{рез}} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

**Резонансом** в электрическом колебательном контуре называется явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний при совпадении частоты внешнего переменного напряжения с собственной частотой колебательного контура.

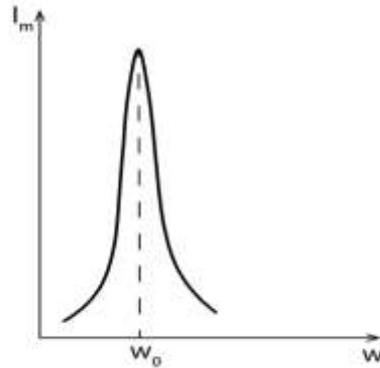


Рис.97. Резонанс токов

Мощность цепи переменного тока.

$$P(t) = i(t) \cdot u(t)$$

$$P(t) = I_m \cos \omega t U_m \cos(\omega t + \varphi),$$

$$P(t) = I_m \cos \omega t U_m \cos(\omega t + \varphi),$$

$$P(t) = \frac{1}{2} I_m U_m [\cos(\omega t - \omega t - \varphi) + \cos(\omega t + \omega t + \varphi)],$$

$$P(t) = \frac{1}{2} I_m U_m \cos \varphi + \frac{1}{2} I_m U_m \cos(2\omega t + \varphi)$$

$$P = \langle P(t) \rangle = \frac{1}{2} I_m U_m \cos \varphi = I_d U_d \cos \varphi$$

$\cos \varphi$  - коэффициент мощности,  $\operatorname{tg} \varphi = \frac{\frac{1}{\omega C} - \omega L}{R}$

### Задача

Последовательно с электроплиткой в сеть подключена катушка индуктивности, при этом мощность, выделяющаяся в плитке, уменьшилась в 2 раза. Найти индуктивность катушки, если сопротивление плитки 50 Ом.

Дано:  $R = 50$  Ом,  $\vartheta = 50$  Гц.

Рисунок.

$$P_1 = I_1 U = \frac{U^2}{R},$$

$$P_2 = I^2 R = \frac{U^2 R}{R^2 + \omega^2 L^2},$$

$$I_2 = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}},$$

$$\frac{U^2}{R} = 2 \frac{U^2 R}{R^2 + (\omega L)^2},$$

$$R^2 + \omega^2 L^2 = 2R^2,$$

$$L = \frac{R}{\omega} = \frac{R}{2\pi\nu} \approx 0,16 \text{ Гн.}$$

### Трансформаторы

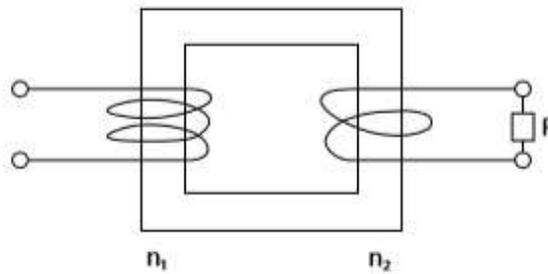


Рис.98. Трансформатор

**Трансформатор** - устройство преобразования переменного тока, при котором напряжение увеличивается или уменьшается практически без потерь мощности.

$$i_1 R_1 = \varepsilon + e n_1,$$

$$i_2 R_2 = \varepsilon + e n_2,$$

$$i_1 R_1 = \varepsilon + \frac{i_2 R_2}{n_2} n_1,$$

$$i_2 R_2 = U_2 = \varepsilon \frac{n_2}{n_1},$$

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

$k = \frac{n_1}{n_2}$  - коэффициент трансформации.

$k > 1$  - трансформатор, повышающий.

$k < 1$  - трансформатор, понижающий.

$$P = J_1 U_1 \approx J_2 U_2$$

## Передача электроэнергии на расстояние



Рис.99. Модель линии передачи

$$\Delta P = J^2 R = \frac{P^2}{U^2 \cos^2 \varphi} = \frac{\rho \cdot 2l}{S}$$

4.4. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ.  
ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК

## Свободные колебания в электрическом контуре

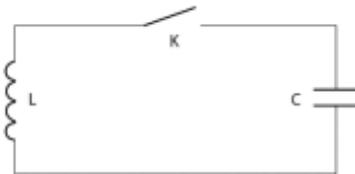


Рис.100. Колебательный контур

$$\Delta \varphi = \varepsilon_{Si} = U = \frac{q}{C}$$

$$\varepsilon_{Si} = -L \frac{di}{dt} = -\frac{1}{C} q$$

$$i = \frac{dq}{dt} = \dot{q},$$

$$i = \frac{di}{dt} = \ddot{q} \Rightarrow L \ddot{q} = -\frac{1}{C} q \Rightarrow \ddot{q} + \frac{1}{LC} q = 0,$$

т.к. заряд на конденсаторе убывает, то перед  $\frac{q}{C}$  стоит знак минус.

$$a_x = -\omega^2 x,$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2x,$$

$$\omega^2 = \frac{1}{LC}$$

### Задача

Найти максимальное значение токов, текущих через катушки в контуре, состоящем из конденсатора  $C$ , заряженного до напряжения  $U_0$  и двух катушек индуктивности  $L_1$  и  $L_2$ , соединенных параллельно.

Рисунок.

$$\frac{CU_0}{2} = \frac{L_1 I_1^2}{2} + \frac{L_2 I_2^2}{2},$$

$$\Delta\varphi = \varepsilon_{si1} = \varepsilon_{si2},$$

$$L_1 \frac{\Delta I_1}{\Delta t} = L_2 \frac{\Delta I_2}{\Delta t},$$

$$L_1 \Delta I_1 = L_2 \Delta I_2,$$

т.к. при  $\Delta I_1 = \frac{L_2}{L_1} \Delta I_2$ , то  $CU_0^2 = L_1 \frac{L_2^2}{L_1^2} I_2^2 + L_2 I_2^2$ ,

$$I_2^2 = \frac{CU_0^2}{L_2(L_1 + L_2)} L_1$$

$$I_m = I_2 = \sqrt{\frac{CL_1}{L_2(L_1 + L_2)}} U_0$$

$$I_1 = \sqrt{\frac{CL_2}{L_1(L_1 + L_2)}} U_0$$

Затухающие колебания

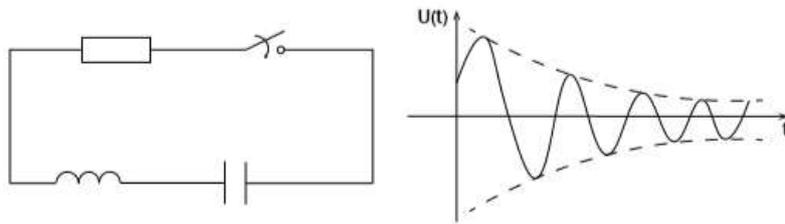


Рис.101. Затухающие колебания

$$i(t) = A(t) \sin \omega t$$

$$A(t) = J_0 e^{-\beta t} \text{ частота затухающих колебаний } (\beta t).$$

$$\beta = \frac{R}{2L}$$

$\beta$  - коэффициент затухания.

Затухающие колебания возможны, если выполняется условие:  $R < R_{кр} = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ , где  $R_{кр}$  - критическое сопротивление в случае, если  $R > R_{кр}$ , то в цепи будут происходить непериодические изменения тока.

#### Задача.

Найти уменьшение амплитуды колебаний заряда на конденсаторе за время равное периоду колебаний  $T$ , в последовательном колебательном контуре, состоящем из  $R, L, C$ .

$$\frac{q_0^2}{2C} = \frac{q_1^2}{2C} + \langle i^2(t) \rangle RT,$$

$$\langle i^2(t) \rangle = \frac{1}{2} I_m^2,$$

$$\frac{q_0^2 - q_1^2}{2C} = \frac{1}{2} I_m^2 T R \frac{L}{L},$$

$$\frac{(q_0 - q_1)(q_0 + q_1)}{2C} \approx \frac{q_0^2 R}{2C L} T,$$

$$\frac{q_0 - q_1}{q_0} = \frac{R}{2L} T.$$

Вынужденные колебания. Резонанс

$$\omega_{рез} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2}$$

$$\omega_0^2 = \frac{1}{LC}$$

#### 4.5. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

Изменение магнитного поля со временем, вызывает появление вихревого электрического поля, также изменяющегося со временем. Напряженность вихревого электрического поля

пропорциональна скорости изменения магнитного поля. Переменное электрическое поле, в свою очередь, порождает изменяющееся магнитное поле (Максвелл). Переменные электрическое и магнитное поля взаимосвязаны и образуют единое электромагнитное поле, действующее на движущийся электрический заряд с силой Лоренца:

$$F = q\vec{E} + q[\vec{v}\vec{B}]$$

Напряженность электрического поля и индукция магнитного поля являются различными в разных инерциальных системах отсчета, но полное действие электромагнитного поля не зависит от системы отсчета.

#### Излучение электромагнитных волн

Для создания электромагнитной волны необходимо выполнение двух условий:

- высокая частота излучателя  $\omega > 300$  кГц,
- наличие излучателей, размеры которых сравнимы с длиной волны.

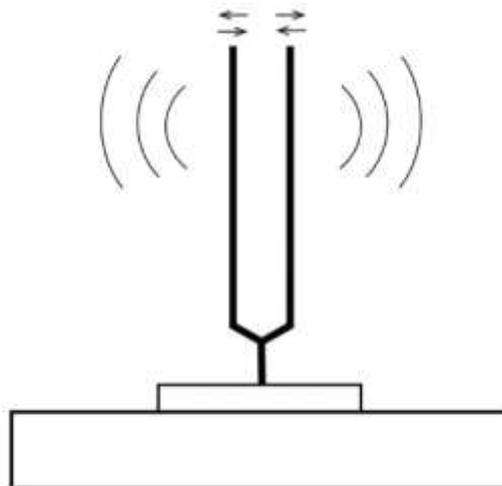


Рис.102. Излучатель

## Свойства электромагнитных волн

- 1) Электромагнитные волны распространяются в вакууме со скоростью  $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$
- 2) В среде скорость распространения волны всегда меньше скорости света в вакууме  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ ,
- 3) Электромагнитные волны являются поперечными,
- 4) Электромагнитные волны переносят энергию.

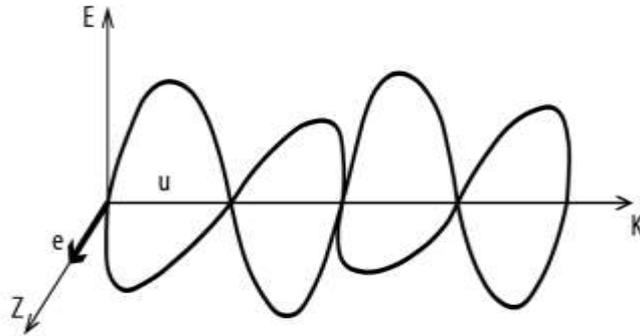


Рис.103. Электромагнитные волны

**Интенсивность волны** (средняя за период плотность потока энергии) - среднее за период отношение энергии переносимой волной через площадку перпендикулярную направлению распространения волны к площади этой площадки и промежутку времени.

$$J = \frac{\Delta W}{\Delta S \Delta t}$$

Рисунок.

$\omega$  - объемная плотность энергии.

$$\omega = \frac{\Delta W}{\Delta V}$$

$$\Delta W = \omega \Delta V = \omega \Delta S v \Delta t$$

$$J = \frac{\omega \Delta S v \Delta t}{\Delta S \Delta t} = \omega v$$

Интенсивность волны равна произведению объемной плотности энергии волны на скорость распространения волны.

$$\omega_{\text{эл}} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 E^2}{2}$$

$$\omega_{\text{маг}} = \frac{B^2}{2\mu\mu_0} = \frac{\mu\mu_0 H^2}{2}$$

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

5) Интенсивность электромагнитной волны пропорциональна 4-й степени частоты.

6) Интенсивность электромагнитной волны от точечного источника убывает обратно-пропорционально квадрату расстояния:

$$J = \frac{\Delta W}{\Delta t S} = \frac{\Delta W}{4\pi t R^2} \Rightarrow J \sim \frac{1}{R^2}$$

#### Принципы радиосвязи

Длинные и средние волны огибают препятствия, короткие отражаются от атмосферы.

Для осуществления радиосвязи необходимы:

- 1) передатчик,
- 2) передающая антенна,
- 3) приемная антенна,
- 4) приемник.

**Передатчик** состоит из генератора высокочастотных колебаний и модулятора.

Для получения электромагнитных волн необходим открытый колебательный контур.

**Амплитудная модуляция** - изменение амплитуды высокочастотных колебаний в соответствии с законами изменения передаваемого сигнала.

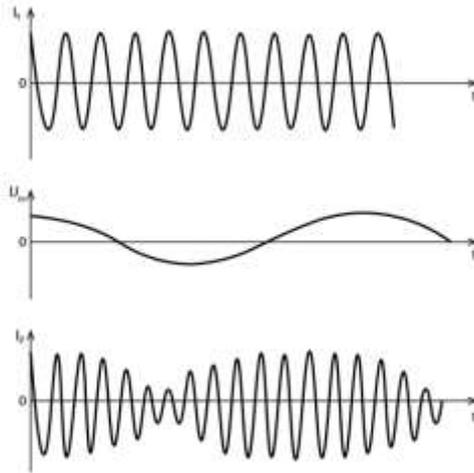


Рис.104

**Приемник** состоит из колебательного контура и детектора.

## 5. ОПТИКА

### 5.1. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

Геометрической оптикой называется раздел оптики, в котором изучаются законы распространения световой Энергии в прозрачных средах на основе представления о световом луче.

Лучом называется линия, показывающая направление распространения световой волны и перпендикулярная волновым поверхностям.

#### 5.1.1. Основные законы геометрической оптики.

1) Свет в однородной среде распространяется прямолинейно (Закон прямолинейного распространения света.)

2) Световые пучки распространяются независимо и их пересечение не оказывает влияния на их дальнейшее распространение (Закон независимости распространения света).

3) Отражение и преломление:

**Угол падения (отражения и преломления)** - угол между падающим (отраженным, преломленным) лучом и перпендикуляром к поверхности раздела двух сред, проведенным через точку падения.

- Падающий, отраженный и преломленный лучи и перпендикуляр к поверхности раздела двух сред, проведенный через точку падения, лежат в одной плоскости.

- Угол падения равен углу отражения ( $\alpha = \beta$ ).

Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная (не зависящая от угла падения) для двух сред.

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n$$

$n$  - показатель преломления второй среды относительно первой  $n = \frac{v_{\text{света } 1}}{v_{\text{света } 2}}$ , т.е. отношение скоростей света в данных средах

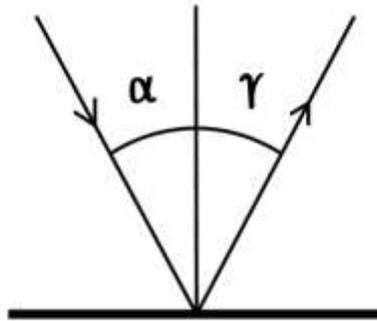


Рис.105. Отражение света

4) Если при выходе из оптической системы, отражающей и преломляющей сред отразить луч точно назад, то он вернется по тому же пути к источнику (Закон обратимости световых лучей).

#### 5.1.2. Зеркала

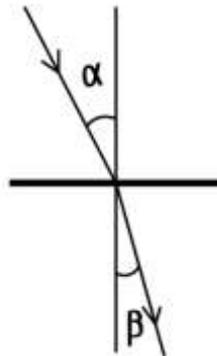


Рис.106. Преломление света

Зеркальной поверхностью называется поверхность, после отражения от которой параллельный пучок лучей остается параллельным.

**Изображением** светящейся точки в оптической системе является точка пересечения лучей или их продолжений при выходе из этой системы.

Если изображение образуется пересечением самих лучей, то оно называется **действительным** (в точках изображения концентрируется световая энергия).

Если изображение образуется пересечением продолжений лучей, то оно называется **мнимым** (точки мнимого изображения световой энергии не имеют).

Изображение светящейся точки в плоском зеркале является мнимым, находится на пересечении перпендикуляра к поверхности зеркала, проходящем через светящуюся точку, и находится на том же расстоянии от зеркала.

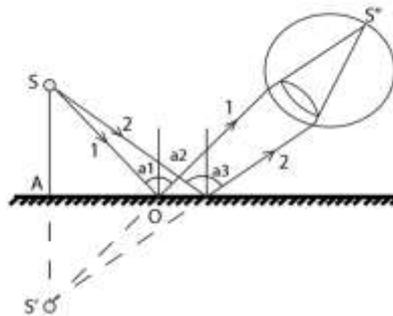


Рис.107. Изображение светящейся точки

Центр сферы, частью которой является сферическое зеркало, называется **оптическим центром зеркала**.

Средняя точка сферического сегмента называется **полюсом** зеркала.

**Оптической осью** зеркала называется линия, проходящая через оптический центр зеркала.

Оптическая ось, проходящая через полюс, называется **главной оптической осью**.

Сферические зеркала бывают выпуклыми и вогнутыми.

Точка, в которой пересекаются после отражения лучи параллельные главной оптической оси называется фокусом зеркала.

Плоскость, проходящая через фокус и перпендикулярная главной оптической оси, называется фокальной плоскостью.

Принципы построения изображения в сферическом зеркале.

1) Луч, проходящий через оптический центр, после отражения идет по той же линии.

2) Луч, параллельный главной оптической оси после отражения проходит через Фокус.

3) Луч, проходящий через Фокус, после отражения идет параллельно главной оптической оси.

4) Луч, падающий на зеркало и лучи параллельные ему пересекаются в одной точке в фокальной плоскости.

Из подобия треугольников:

$$\frac{h'}{h} = \frac{f - F}{F} = \frac{F}{d - F}$$

$$\frac{d}{f} = \frac{f - F}{F}$$

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

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

- формула сферического зеркала.

Свойства изображения в вогнутом зеркале

1)  $d < F$

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

$$f = \frac{Fd}{d - F} < 0$$

Если  $f(d, F) < 0$ , то изображение является мнимым.

$$\Gamma = \left| \frac{f}{d} \right| = \frac{F}{|d - F|} < 1$$

Если  $d < F$ , то изображение является мнимым, увеличенным и прямым.

$$2) F < d < 2F$$

$$f = \frac{dF}{d - F} > 0$$

$$\Gamma = \left| \frac{f}{d} \right| = \frac{F}{|d - F|} > 1$$

Если  $F < d < 2F$ , то изображение является действительным, увеличенным и перевернутым.

$$3) 2F < d$$

$$f = \frac{dF}{d - F} > 0$$

$$\Gamma = \left| \frac{f}{d} \right| = \frac{F}{|d - F|} < 1$$

Если  $d > 2F$ , то изображение является действительным, уменьшенным, перевернутым.

Свойства изображения в выпуклом зеркале

$$F < 0$$

$$F = -\frac{R}{2}$$

$$f = \frac{dF}{d - F} = -\frac{dF}{d + |F|} < 0$$

$$\Gamma = \left| \frac{f}{d} \right| = \frac{|F|}{d + |F|} < 1$$

Изображение уменьшенное, мнимое, прямое

### 5.1.3. Преломление света

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n_{2,1}$$

**Абсолютным показателем преломления** называется показатель преломления среды относительно вакуума.

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma_0} = n_1$$

$$\frac{\sin \alpha_0}{\sin \gamma} = n_2$$

$$\frac{n_2}{n_1} = n_{2,1}$$

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{n_2}{n_1} = n_{2,1}$$

**Оптически более плотной средой** называется среда с большим абсолютным показателем преломления.

Исчезновение преломленного луча при переходе из оптически более плотной среды в менее плотную называется **явлением полного отражения**.

$$\sin \alpha_0 = \frac{n_2}{n_1}$$

$$\alpha_0 = \arcsin \frac{n_2}{n_1}$$

$\alpha_0$  - предельный угол полного отражения.

#### 5.1.4. Линзы

**Линза** - прозрачное тело, ограниченное сферическими поверхностями.

Для **выпуклой** линзы толщина в центре максимальна (собирающая).

Для **вогнутой** - толщина в центре - min.

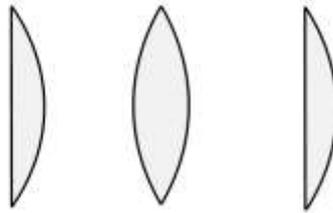


Рис.108. Собирающие линзы

Тонкой линзой называют такую линзу, у которой толщина много меньше радиусов сферических поверхностей.

Положение тонкой линзы можно охарактеризовать одной плоскостью.

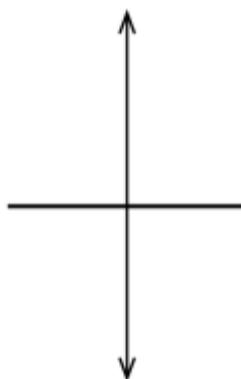


Рис.109. Схематическое изображение собирающей линзы

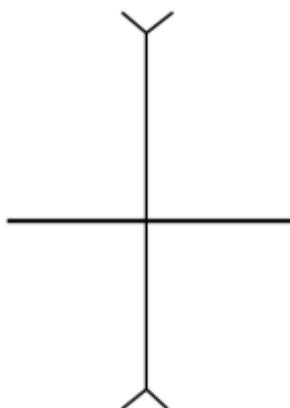


Рис.110. Схематическое изображение рассеивающей линзы.

Линию, проходящую через центры сферических поверхностей, ограничивающих линзу, называют **главной оптической осью линзы**

**Оптический центр линзы** - точка пересечения главной оптической оси и плоскости линзы.

Линия, проведенная через оптический центр, называется **побочной оптической осью**.

**Фокус** - точка, в которой пересекаются лучи (или их продолжения) после выхода из линзы, падающие параллельно главной оптической оси.

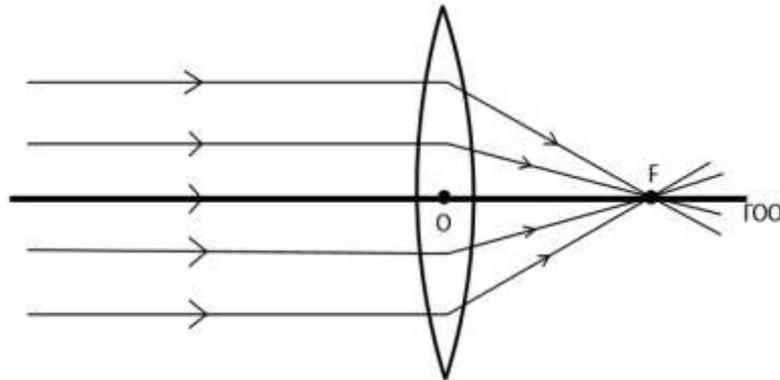


Рис.111. Фокус Собирающей линзы

**Передний фокус линзы** - это фокус, который находится со стороны падающих лучей.

**Фокальная плоскость линзы** - плоскость перпендикулярная главной оптической оси и проходящая через фокус.

Лучи, параллельные побочной оптической оси, пересекаются в точке, лежащей на фокальной плоскости после выхода из линзы.

**Оптическая сила линзы** - величина, обратная фокусному расстоянию  $D = \frac{1}{F}$

#### Построение изображения в линзе

Для построения изображения можно использовать три луча:

- луч, проходящий через оптический центр линзы;
- луч, параллельный главной оптической оси;
- луч, проходящий через передний фокус.

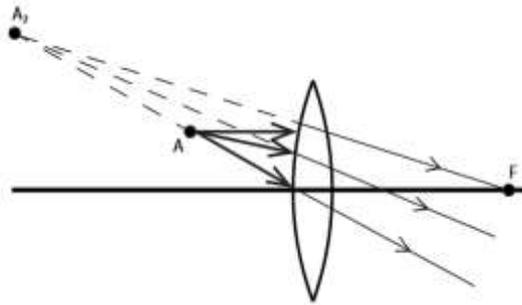


Рис.112. Ход лучей

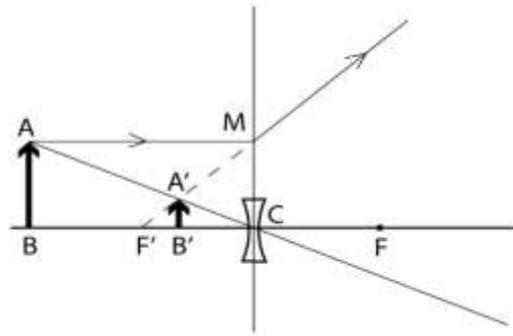


Рис.113. Построение изображения в рассеивающей линзе

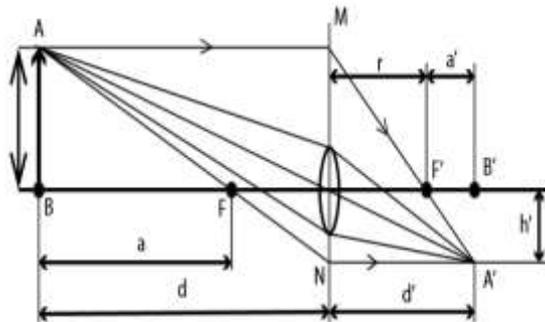


Рис.114. Построение изображения в собирающей линзе



В рассеивающей линзе изображение всегда мнимое, прямое, уменьшенное и находится с той же стороны, что и предмет.

$$D = \frac{1}{F} = \frac{(n - n_0)}{n_0} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

Формула линзы с учетом правила знака.

Введем систему координат:

1) начало отсчета совместим с оптическим центром линзы,

2) ось x направим вдоль главной оптической оси в сторону от предмета.

Запишем формулу линзы в следующем виде:

$$\frac{1}{F'_x} = \frac{1}{f_x} - \frac{1}{d_x}$$

где  $F'_x$  - проекция заднего фокуса на ось x,  $f_x$  - проекция изображения на ось x,  $d_x$  - проекция предмета на ось x.

#### 5.1.5. Глаз как оптическая система

Глаз - чувствительная система, воспринимает даже  $2 \div 3$  кванта света.

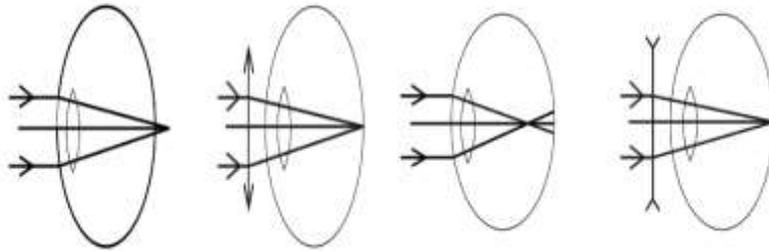


Рис.116

**Лупа** - двояковыпуклая короткофокусная линза.

Приспособление глаза (изменение кривизны хрусталика) к изменению расстояния до наблюдаемого предмета называется **аккомодацией** глаза.

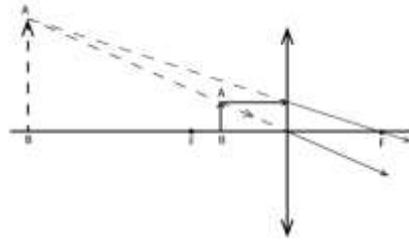


Рис.117

При наблюдении через лупу ее обычно помещают близко к глазу, а предмет располагают в фокальной плоскости лупы. Изображение предмета в собирающей линзе

#### 5.1.6. Микроскоп и телескоп

Микроскопы состоят из объектива и окуляра.

**Объектив** - линза, обращенная к предмету.

**Окуляр** - линза, обращенная к глазу.

Объектив дает увеличенное и действительное изображение вблизи фокуса окуляра.

Увеличение микроскопа равно произведению увеличений объектива и окуляра.

$$\Gamma_M = \Gamma_{об} \times \Gamma_{ок}$$

## 5.2. ВОЛНОВЫЕ СВОЙСТВА СВЕТА

### 5.2.1. Вывод законов отражения и преломления света на основе волновых представлений

#### Принципы Гюйгенса

Каждая точка волновой поверхности является источником вторичных сферических волн, а огибающая фронтов этих волн через небольшой промежуток времени, дает положение другой волновой поверхности.

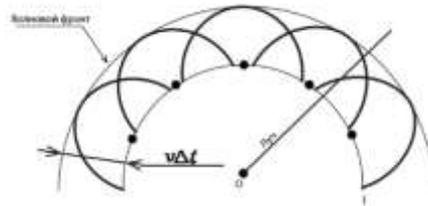


Рис.118. Принцип Гюйгенса

На основе принципа Гюйгенса можно доказать законы преломления и отражения света на границе раздела двух сред, смотри рисунки

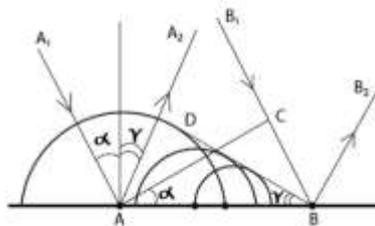


Рис.119 Отражение света на основе принципа Гюйгенса

$$\sin \alpha = \frac{v_1 \Delta t}{AB}$$

$$\sin \gamma = \frac{v_2 \Delta t}{AB}$$

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2}$$

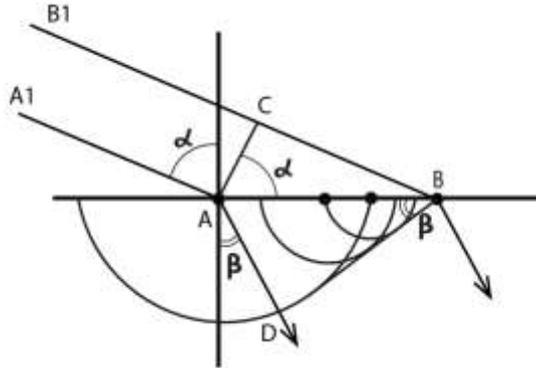


Рис.120 Преломление света на основе принципа Гюйгенса

Скорость распространения света в среде  $v$  равна скорости света в вакууме  $c$ , деленной на абсолютный показатель преломления  $n$ .

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

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

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

### 5.2.2. Дисперсия света

Явление, связанное с зависимостью показателя преломления от частоты (длины волны) света, называется **дисперсией** света.

$$\lambda = \frac{v}{\vartheta} = \frac{c}{n\vartheta} = \frac{\lambda_{\text{вак}}}{n}$$

### 5.2.3. Интерференция света

**Интерференция света** - сложение когерентных волн в пространстве, при котором получается постоянное во вре-

мени распределение амплитуд.

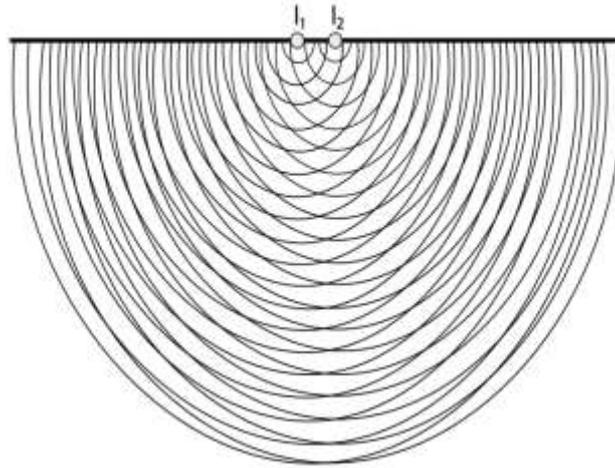


Рис.121. Интерференция

Для получения устойчивой картины распределения амплитуд, нужны **когерентные волны** - волны с одинаковой частотой и разностью фаз.

$$E_1 = A_1 \cos\left(\omega t - \frac{2\pi x_1}{\lambda}\right)$$

$$E_2 = A_2 \cos\left(\omega t - \frac{2\pi x_2}{\lambda}\right)$$

$$\varphi_2 - \varphi_1 = \frac{2\pi x_2}{\lambda} - \frac{2\pi x_1}{\lambda} = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta$$

$\Delta = x_2 - x_1$  - оптическая разность хода.

Если оптическая разность хода когерентных волн в данной точке равна целому числу длин волн, то при сложении этих волн получается максимальная амплитуда.

**Оптическая разность хода** - разность оптических длин путей двух волн.

**Оптическая длина пути** - произведение показателя преломления на геометрическую длину пути.

## 5.2.4. Дифракция света

**Дифракция света** - явление, обусловленное огибанием волнами препятствий.

## Принцип Гюйгенса-Френеля

Волновая поверхность является огибающей вторичных волн, испускаемых точечными источниками с другой волновой поверхности, а амплитуда волны определяется суммой амплитуд вторичных волн, при условии, что они когерентны.

## Дифракционная решетка

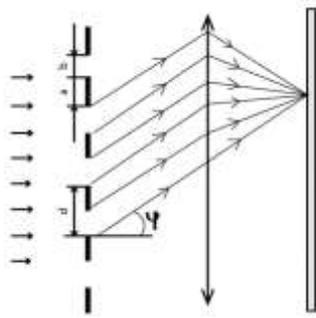


Рис.122 Дифракционная решетка

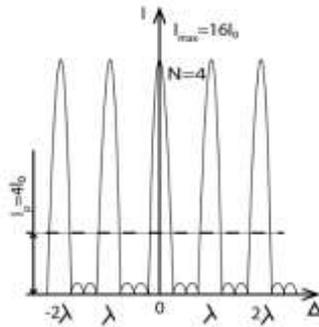


Рис.123 Зависимость интенсивности света от оптической разности хода дифракционная решетка

### 5.3. КОРПУСКУЛЯРНЫЕ СВОЙСТВА СВЕТА

#### Фотон (квант)

Свет распространяется, излучается, поглощается в виде **квантов (фотонов)** - элементарных частиц, с энергией  $\varepsilon = h\nu = h\omega$  где  $h = 6,62 \times 10^{-34}$  Дж·с - постоянная Планка, а  $\omega$  - частота света. Масса покоя фотона равна нулю, а скорость равна скорости света.

#### 5.3.1. Законы фотоэффекта

**Фотоэффект** - испускание электронов поверхностью металла, под воздействием света.

1) Число электронов, вылетающих с поверхности за единицу времени при фотоэффекте пропорционально интенсивности света (пропорционально световому потоку)

2) Фототок насыщения пропорционален потоку энергии (интенсивности света).

3) Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов зависит только от частоты (длины волны) света и не зависит от его интенсивности.

4) Для каждого вещества существует некоторая граничная частота, меньше которой фотоэффект не наблюдается. Эта частота (длина волны) называется **красной границей фотоэффекта**.

Уравнение Эйнштейна (для фотоэффекта)

$$h\nu = T_{max} + A_{вых}$$

Работа выхода ( $A_{вых}$ ) - наименьшая энергия, которую нужно сообщить электрону, чтобы он покинул поверхность металла.

$$I = \frac{\Delta W}{\Delta S \Delta t} = \frac{\Delta N \varepsilon}{\Delta S \Delta t} = \frac{n \Delta S c \Delta t \varepsilon}{\Delta S \Delta t} = n \varepsilon c = c \omega$$

## Давление света

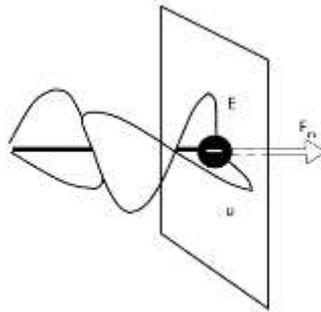


Рис.124 Давление света

$$P_{\text{давл}} = (1 + R)\omega$$

$$P_{\text{давл}} = \frac{\varepsilon}{\Delta S}$$

$$f = \frac{\Delta P}{\Delta t} = \frac{\varepsilon}{c\Delta t}$$

$$N = n\Delta S c \Delta t$$

$$P_{\text{давл}} = n\varepsilon = \omega - \text{ для поглощающего случая.}$$

## 5.3.3. Эффект Комптона

Это явление, заключающееся в рассеянии фотонов на свободных электронах.

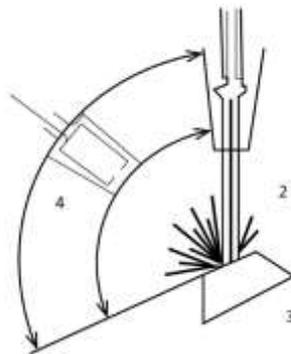


Рис.125. Эффект Комптона



Рис.126 Эффект Комптона

$$\lambda - \lambda_0 = 2\lambda_c \sin^2 \frac{\varphi}{2}$$

$$h\nu_0 + m_e c^2 = h\nu + m_e c^2 + E_e$$

$$\vec{p} = \vec{p}' + \vec{P}_e$$

Развитие взглядов на природу света.

Свет распространяется в виде фотонов (квантов) и, наряду с этим, обладает волновыми свойствами.

В ряде эффектов ярко проявляются волновые свойства света (интерференция, дифракция); в других - корпускулярные свойства (фотоэффект, эффект Комптона), этот факт носит название **корпускулярно-волнового дуализма** природы света.

## 6. АТОМЫ. АТОМНЫЕ ЯДРА

Строение и свойства атомов, ядра

Заряд электрона =  $-1,6 \times 10^{-19}$  Кл,

Масса электрона =  $0,9 \times 10^{-30}$  кг.

### 6.1. ЯДЕРНАЯ МОДЕЛЬ АТОМА

Суть атомной модели Резерфорда в следующем: в центре находится массивное небольшое положительно заряженное ядро, вокруг которого движутся электроны.

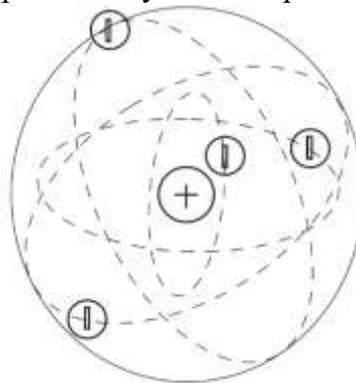


Рис.127

Заряд электрона  $e = -1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл,

Масса электрона  $m_e = 0,9 \cdot 10^{-30}$  кг,

Заряд ядра  $q_0 = +Ze$ ,

$Z$  – целое число, совпадающее с порядковым номером элемента в периодической системе элементов Менделеева,

$R_{\text{я}} = 10^{-15} - 10^{-14}$  м.

### 6.2. СПЕКТРАЛЬНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ

Спектр излучения – зависимость интенсивности излучения той или иной волны от длины волны.

Спектры бывают: сплошные и линейчатые.

Для объяснения линейчатых спектров Бор выдвинул 3 постулата:

- 1) Существуют некоторые стационарные состояния атома, находясь в которых атом не излучает;
- 2) Излучение атома происходит, при переходе из одного стационарного состояния (с большей энергией) в другое стационарное состояние, в виде одного кванта света;
- 3) Для круговых орбит движения электрона в атоме произведение модуля импульса на радиус орбиты должно быть кратно постоянной Планка.

$$\hbar = \frac{h}{2\pi}$$

Боровская модель атома водорода

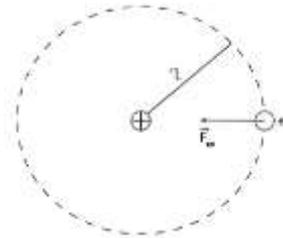


Рис. 128

$$m \frac{v^2}{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2}$$

$$E = \frac{mv^2}{2} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r}$$

$$mvr = n\hbar$$

Отсюда радиус Боровской орбиты равен:

$$r_n = \frac{\hbar^2}{me^2} 4\pi\epsilon_0 n^2$$

Основное состояние – состояние атома в котором он может пребывать сколь угодно долго при отсутствии внешних воздействий.

Основное состояние имеет наименьший радиус атома, соответствующий  $n = 1$ .

$$r_1 = \frac{\hbar}{me^2} 4\pi\epsilon_0$$

$$E = -\frac{1}{2} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r}$$

$$E_n = -\frac{1}{2} \frac{e^2 m e^2}{(4\pi\epsilon_0)^2 \hbar^2} \frac{1}{n^2} = -\frac{1}{2} \frac{e^4 m}{(4\pi\epsilon_0)^2 \hbar^2} \frac{1}{n^2}$$

$$n = 1, 2, 3, \dots$$

$$v = \frac{c}{\lambda} = \frac{E_n - E_m}{h} = A \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

#### Волновые свойства микрочастиц

Гипотеза де Бройля: присущее свету сочетание корпускулярных и волновых свойств не является особенностью только светового явления.

Волновыми свойствами должны обладать и частицы вещества (атомы, электроны, молекулы и т.д.)

$$v = \frac{E_K}{h}$$

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

#### Принцип неопределенности

Для микрочастицы ее координата  $x$  и проекция импульса на эту ось не могут быть определены одновременно сколь угодно точно. В их значениях всегда есть некоторые неопределенности, такие, что произведение их не меньше  $\frac{\hbar}{2}$

$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2}$$

Явление проникновения микрочастиц с определенной вероятностью в области, недоступные для классического движения, называется **туннельным эффектом**.

Ядро состоит из протонов и нейтронов  $q_p = +e$ ,  $q_n = 0$ .

$m_p = 1,672 \cdot 10^{-27}$  кг,  $m_n = 1,6 \cdot 10^{-27}$  кг;  $E_p = 938,2$  МэВ,  $E_n = 936,5$  МэВ.

Протоны и нейтроны называют нуклонами, заряд ядра при этом:

$$q_{\text{я}} = +Ze$$

$Z$  – совпадает с порядковым номером в периодической системе

$N$  – число нейтронов

$$A = N + Z$$

Разновидности химического элемента, атомы которых различаются по массе, называют **изотопами**



Атомная единица массы – это  $1/12$  массы атома изотопа углерода  ${}^{12}_6\text{C}$

$$1 \text{ а. е.} = \frac{1}{12} M({}^{12}_6\text{C})$$

$A$  – полное число нуклонов (полное массовое число) дает приближенное значение массы ядра.

Энергией связи атомного ядра называется энергия, необходимая для разделения ядра на составляющие нуклоны:

$$E_{\text{св}} = (NE_n + ZE_A) - E_{\text{я}}$$

## ОГЛАВЛЕНИЕ

1 МЕХАНИКА .....	1
1.1 КИНЕМАТИКА .....	4
1.1.1 Введение в кинематику.....	4
1.1.2 Кинематика равномерного движения.....	7
1.1.3 Кинематика равноускоренного движения .....	9
1.1.4 Кинематика криволинейного движения.....	12
1.1.5 Кинематика абсолютно твердого тела .....	16
1.2. ДИНАМИКА .....	20
1.2.1 Динамика материальной точки. ....	20
1.2.2. Силы в природе. ....	23
1.2.3. Движение искусственных спутников планет .....	28
1.3. ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ. ....	30
1.3.1. Закон сохранения импульса. ....	30
1.3.2. Работа. Мощность. Энергия. ....	32
1.3.3. Закон сохранения механической энергии.....	36
1.3.4. Столкновение тел. ....	38
1.4. СТАТИКА.....	40
1.4.1. Равновесие материальной точки и абсолютно твердого тела.....	40
1.4.2. Гидростатика.....	44
2. ТЕРМОДИНАМИКА. ....	46
2.1. ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКИ .....	46
2.1.1. Основные положения молекулярно-кинетической теории .....	46
2.1.2. Основные понятия молекулярной физики. ....	47
2.2. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ .....	49
2.2.1. Идеальный газ.....	49
3. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ.....	75
3.1 ВАЖНЕЙШИЕ ПОНЯТИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИКИ.....	75
3.2. ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ.....	78
3.3 ЭЛЕКТРОЕМКОСТЬ.....	90
3.4 ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК. ....	94
3.5 МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ (МП).....	108
3.6 ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ.....	118

3.7 ПОЛУПРОВОДНИКИ.....	123
4. КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ. ....	129
4.1. МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ. ....	129
4.2 ВОЛНЫ. ....	137
4.3. ПЕРЕМЕННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК. ....	139
4.4. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ. ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК .....	146
4.5. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ. ....	148
5. ОПТИКА.....	153
5.1. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА.....	153
5.1.1. Основные законы геометрической оптики. ....	153
5.1.2. Зеркала.....	154
5.1.3. Преломление света. ....	157
5.1.4. Линзы.....	158
5.1.5. Глаз как оптическая система. ....	163
5.1.6. Микроскоп и телескоп. ....	164
5.2. ВОЛНОВЫЕ СВОЙСТВА СВЕТА. ....	165
5.2.1. Вывод законов отражения и преломления света на основе волновых представлений. ....	165
5.2.2. Дисперсия света.....	166
5.2.3. Интерференция света. ....	166
5.2.4. Дифракция света.....	168
5.3. КОРПУСКУЛЯРНЫЕ СВОЙСТВА СВЕТА.....	169
5.3.1. Законы фотоэффекта. ....	169
5.3.3. Эффект Комптона.....	170
6. АТОМЫ. АТОМНЫЕ ЯДРА.....	172
6.1. ЯДЕРНАЯ МОДЕЛЬ АТОМА.....	172
6.2. СПЕКТРАЛЬНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ .....	172

178

**ДЛЯ ЗАМЕТОК**