

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ОРЕНБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Кафедра «Физика»

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ
ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ**

Физика

Направление подготовки (специальность) 36.03.02 Зоотехния

Профиль образовательной программы *Технология производства продуктов
животноводства*

Форма обучения *очная*

Оренбург 2016 г.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Конспект лекций	
1.1 Лекция № 1 Физические основы механики	
1.2 Лекция № 2 Молекулярная физика и термодинамика	
1.3 Лекция № 3 Электростатика. Постоянный электрический ток	
1.4 Лекция № 4 Магнитное поле. Электромагнитная индукция	
1.5 Лекция № 5 Волновая оптика	
1.6 Лекция № 6 Квантовая природа излучения	
1.7 Лекция № 7 Элементы физики атома и атомного ядра	
2. Методические указания по выполнению лабораторных работ	
2.1 Лабораторная работа № 1 ЛР-1 Определение момента инерции шатуна	
2.2 Лабораторная работа № 2 ЛР-2 Соударения упругих шаров	
2.3 Лабораторная работа № 3 ЛР-3 Закон сохранения механической энергии	
2.4 Лабораторная работа № 4 ЛР-4 Определение ускорения свободного падения тел с помощью математического маятника	
2.5 Лабораторная работа № 5 ЛР-5 Изучение закона свободных колебаний упруго деформированного тела	
2.6 Лабораторная работа № 6 ЛР-6 Определение коэффициента вязкости жидкости методом Стокса	
2.7 Лабораторная работа № 7 ЛР-7 Определение относительной влажности воздуха с помощью психрометра	
2.8 Лабораторная работа № 8 ЛР-8 Последовательное и параллельное соединение проводников	
2.9 Лабораторная работа № 9 ЛР-9 Изучение зависимости сопротивления лампы накаливания от тока накаливания	
2.10 Лабораторная работа № 10 ЛР-10 Цепи постоянного тока	
2.11 Лабораторная работа № 11 ЛР-11 Определение длины волны света с помощью дифракционной решетки	
2.12 Лабораторная работа № 12 ЛР-12 Изучение микроскопа	
2.13 Лабораторная работа № 13 ЛР-13 Внешний фотоэффект	
2.14 Лабораторная работа № 14 ЛР-14 Ядра атомов	

1. КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

1.1 Лекция №1 (2 ч)

Тема: Физические основы механики

1.1.1 Вопросы лекции:

1. **Предмет физики и законы физики.** Методы исследования. Характеристика современного состояния физической науки. Роль физики в сельском хозяйстве. Движение как главная форма существования материи. Траектория, длина пути, вектор перемещения. Скорость. Ускорение и его составляющие. Характеристики поступательного и вращательного движений

2. **Динамика поступательного движения.** Динамика. Сила и масса. Законы Ньютона. Неинерциальные системы отсчета. Закон сохранения импульса. Уравнение движения, принцип детерминизма.

3. **Механическая работа, энергия, мощность.** Работа и энергия. Работа переменной силы. Мощность. Энергия – как функция состояния механической системы. Кинетическая и потенциальная энергия. Связь энергии с работой. Законы сохранения и превращения энергии.

4. **Динамика вращательного движения.** Динамика абсолютно твердого тела. Степени свободы твердого тела. Момент силы, момент инерции твердого тела и способы его вычисления. Момент импульса твердого тела, закон его сохранения. Полная кинетическая энергия.

5. **Механические колебания.** Колебательное движение. Гармоническое колебательное движение и его характеристики. Маятники (пружинный, математический и физический). Свободные и затухающие колебания. Энергия колеблющейся системы. Вынужденные колебания. Резонанс. Сложение гармонических колебаний. Бегущие волны.

6. **Элементы механики жидкостей.** Гидродинамика идеальной жидкости. Уравнение неразрывности струи. Уравнение Бернулли и его некоторые приложения. Движение вязкой жидкости. Движение тел в жидкостях и газах.

1.1.2 Краткое содержание вопросов

1. Предмет, задачи и цели физики.

Механика изучает движение тел в пространстве и во времени. *Основная задача механики* – определять положение тела в пространстве в любой момент времени.

Разделы механики:

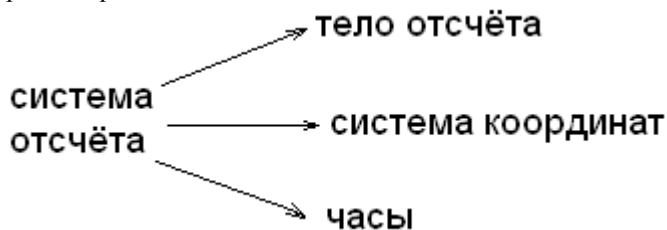
кинематика – изучает движение тел вне связи с причинами, которые изменяют это движение;

динамика – изучает движение тел в связи с причинами, которые изменяют это движение;

статика – является разделом динамики, изучающим равновесие тел.

Механическое движение – перемещение тел относительно какого-либо другого тела или группы тел, принимаемых за неподвижные (тело или группа тел образуют систему отсчета).

Каждое механическое движение рассматривается относительно вполне определенной системы отсчета. Система отсчета выбирается произвольно.



Для описания движения тел в физике используют модели, в частности, такой моделью является материальная точка.

Материальная точка – физическое тело, формами и размерами которого можно пренебречь в условиях данной задачи.

Рассмотрим движение такой материальной точки в трехмерном пространстве. Выберем систему координат, обозначим наложение в ней точки *M* (рис. 1).

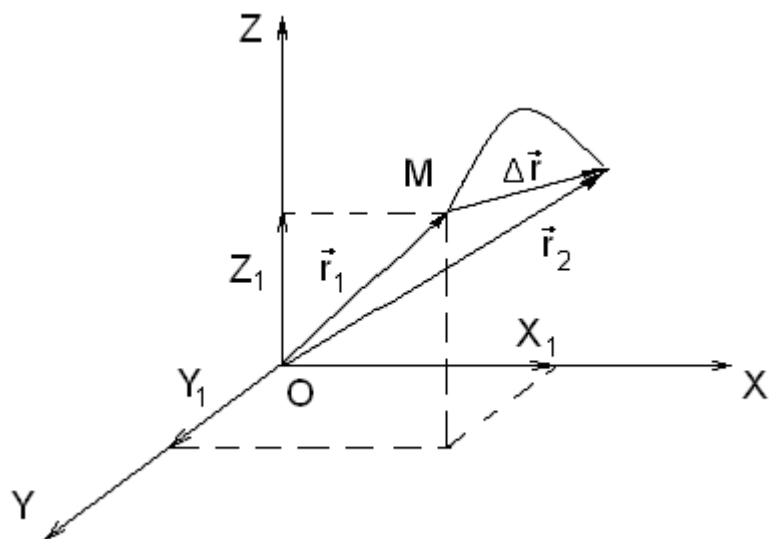


Рис. 1 – Координаты точки в декартовой системе координат

$O\vec{M} = \vec{r}$ – радиус-вектор точки М.

Проекция вектора $O\vec{M}$ на координатные оси даст координаты этой точки – $M(x_1; y_1; z_1)$

Число независимых координат, определяющих положение тела в пространстве называется числом степеней свободы (i). В нашем случае $i = 3$.

Запишем параметрические уравнения движения точки:

$$x = x(t)$$

$$y = y(t) \text{ , или } \vec{r} = \vec{r}(t)$$

$$z = z(t)$$

В векторной форме уравнения движения можно записывать в виде:

$$\vec{r} = \vec{r}(t) \quad (1.1)$$

Линия, описываемая материальной точкой при её движении, называется *траекторией*. Длина участка траектории, пройденного материальной точкой за время t , есть *путь* S . Путь – величина скалярная.

Прямолинейный участок, соединяющий начальную и конечную точки траектории, называется *вектором перемещения* $\Delta\vec{r}$. Перемещение – величина векторная (рис. 2).

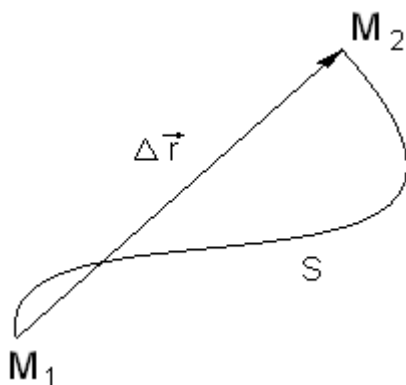


Рис. 2 – Траектория M_1M_2 , путь S , вектор перемещения $\Delta\vec{r}$

В случае прямолинейного движения перемещение и путь совпадают. В случае криволинейного движения путь и перемещение совпадают лишь при условии малости Δt (т.е. при $\Delta t \rightarrow 0$).

1.1.2 Скорость материальной точки

Для характеристики движения материальной точки вводится векторная величина – скорость. *Скорость* – величина, характеризующая быстроту изменения положения точки в пространстве. Средняя скорость:

$$\vec{v}_{cp} = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}, \quad (1.2)$$

где Δr – приращение радиус-вектора.

Направление вектора средней скорости совпадает с направлением Δr . Бесконечно уменьшая промежуток времени Δt , получим мгновенную скорость:

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \frac{d\vec{r}}{dt} \quad (1.3)$$

При $\Delta t \rightarrow 0$ путь S всё больше будет приближаться к Δr . Модуль мгновенной скорости:

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{d\vec{s}}{dt} \quad (1.4)$$

Таким образом, модуль мгновенной скорости равен первой производной пути по времени.

В случае криволинейного движения вектор скорости направлен по касательной в данной точке траектории (рис. 3).

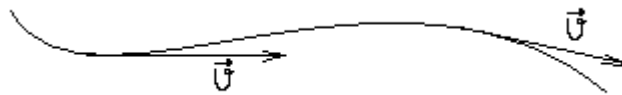


Рис. 3 – Направление вектора скорости

Из формулы (1.4) следует, что в СИ скорость измеряется в м/с.

1.1.3 Ускорение материальной точки

Ускорение \vec{a} (от лат. *acceleratio*) – это векторная величина, характеризующая быстроту изменения скорости по модулю и направлению.

Среднее ускорение в интервале времени Δt – векторная величина, равная отношению изменения скорости $\Delta \vec{v}$ к интервалу времени Δt :

$$\langle \vec{a} \rangle = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} \quad (1.5)$$

Мгновенное ускорение материальной точки – векторная величина, равная первой производной по времени скорости рассматриваемой точки (второй производной по времени от радиус-вектора этой же точки):

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{v}' = \frac{d^2\vec{r}}{dt^2} = \vec{r}'' \quad (1.6)$$

Ускорение характеризует изменение скорости как по направлению a_n – нормальная составляющая ускорения, так и по модулю a_τ – тангенциальная составляющая ускорения.

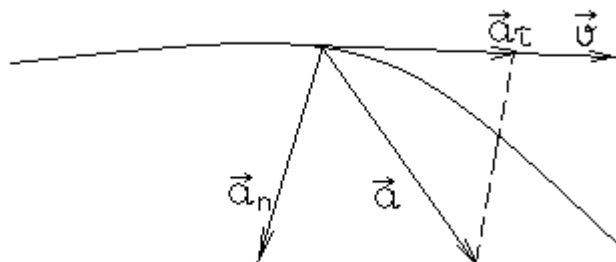


Рис. 4 – Полное ускорение и его составляющие

a_n – направлена в сторону вогнутости кривой и характеризует изменение скорости по направлению:

$$a_n = a_{\text{ц}} = \frac{v^2}{r}, \quad (1.7)$$

где $a_{\text{ц}}$ – центростремительное ускорение.

a_{τ} – характеризует изменение скорости по величине:

$$a_{\tau} = \frac{dv}{dt} \quad (1.8)$$

a – полное ускорение, которое определяется по формуле:

$$\vec{a} = \vec{a}_{\tau} + \vec{a}_n \quad (1.9)$$

В скалярной форме:

$$a = \sqrt{a_n^2 + a_{\tau}^2} \quad (1.10)$$

Ускорение в СИ измеряется в м/с².

1.1.4 Классификация видов движения

В зависимости от a_{τ} и a_n движение можно классифицировать:

- 1) $a_n = 0, a_{\tau} = 0 \Rightarrow$ прямолинейное равномерное движение;
- 2) $a_{\tau} = \text{const}, a_n = 0 \Rightarrow$ прямолинейное равнопеременное движение;
- 3) $a_{\tau} = 0, a_n = \text{const} \Rightarrow$ равномерное движение по окружности;
- 4) $a_{\tau} \neq 0, a_n \neq 0 \Rightarrow$ криволинейное движение с изменяющейся скоростью.

В случае равнопеременного движения: если $a > 0$, то движение равноускоренное; если $a < 0$ –

равнозамедленное. В таком случае $v = v_0 \pm at$; $s = v_0 t \pm \frac{at^2}{2}$.

Кинематика вращательного движения

Следующей моделью в механике является абсолютно твёрдое тело. Тело, при движении которого расстояние между любыми двумя точками неизменно во времени называется *абсолютно твёрдым телом*.

В механике выделяют поступательное и вращательное движение. При *поступательном* движении любая прямая, проведённая в теле, неизменно связанная с ним, перемещается, оставаясь параллельной самой себе. При этом все точки описывают одинаковую траекторию, имеют одинаковую скорость и ускорение. Помимо поступательного движения, тело (материальная точка) может совершать и вращательное движение.

При *вращательном* движении все точки тела описывают окружности, центры которых лежат на неподвижной прямой, называемой осью вращения.

Пусть некоторая точка M движется по окружности радиуса r . За время Δt совершит поворот на угол $\Delta\phi$. $\Delta\phi$ – угол поворота радиус-вектора \vec{r} вокруг точки O (рис. 5).

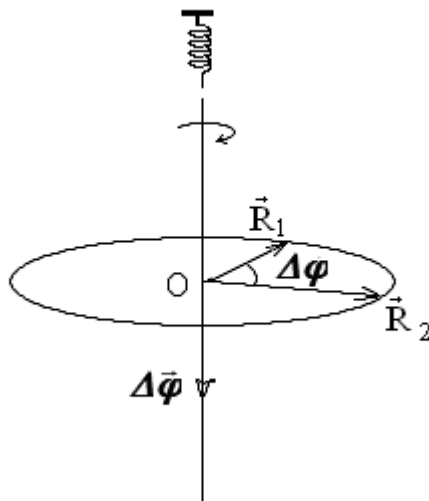


Рис. 5 – Вращение точки по окружности

Элементарные (бесконечно малые) повороты можно рассматривать как векторы (обозначаются $d\phi$ или $\Delta\phi$), их называют *псевдовекторами*.

Особенности псевдовекторов:

- 1) не имеют определённой точки приложения;
- 2) направлены вдоль оси вращения по правилу буравчика (правилу правого винта).

1.1.5 Угловая скорость

Угловая скорость $\vec{\omega}$ – первая производная угла поворота по времени:

$$\vec{\omega} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{\phi}}{\Delta t} = \frac{d\vec{\phi}}{dt} \quad (1.10)$$

Вектор $\vec{\omega}$ направлен вдоль оси вращения, а его направление определяется по правилу правого винта (рис. 6). В СИ единица измерения $\vec{\omega}$ – рад/с.

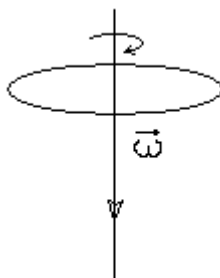


Рис. 6 – Направление угловой скорости

Угол поворота $\Delta\phi$ и угловую скорость ω можно определить:

$$\Delta\phi = 2\pi N \quad (1.11)$$

$$\omega = 2\pi n \quad (1.12)$$

где n – частота вращения, N – число оборотов. Частота вращения – это число полных оборотов, совершаемых телом при равномерном его движении по окружности, в единицу времени:

$$n = \frac{1}{T} \quad (1.13)$$

Время полного оборота тела – период вращения (T). Единица измерения периода T – с, а частоты n – с⁻¹. Учитывая формулу (1.12) и (1.13), можно записать:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (1.14)$$

1.1.6 Угловое ускорение

Угловое ускорение – первая производная угловой скорости по времени:

$$\vec{\beta} = \frac{d\vec{\omega}}{dt} \quad (1.15)$$

$\vec{\beta}$ – величина векторная, направлена, как и угловая скорость, вдоль оси вращения (если ось закреплена):

1) при ускоренном движении $\vec{\beta} \uparrow \uparrow \vec{\omega}$;

2) при замедленном движении $\vec{\beta} \uparrow \downarrow \vec{\omega}$.

В СИ единица измерения $\vec{\beta}$ рад/с².

1.1.7 Связь между линейными и угловыми характеристиками при вращательном движении

1) $s = r\phi$

2) $v = r\omega$

3) $a_{\tau} = r\beta$

4) $a_n = \omega^2 r$

Таблица 1 – Аналогия формул для поступательного и вращательного движения.

поступательное движение	вращательное движение
S	ϕ
a	β
v	ω
$v = v_0 + at$	$\omega = \omega_0 \pm \beta t$
$s = v_0 t \pm \frac{at^2}{2}$	$\phi = \omega_0 t \pm \frac{\beta t^2}{2}$

2. Динамика поступательного движения.

Динамика является основным разделом механики, в её основе лежат 3 закона Ньютона, сформулированные им в 80-х годах XVII столетия.

И з а к о н Н ь ю т о н а. Всякое тело сохраняет состояние покоя или равномерного и прямолинейного движения до тех пор, пока воздействие со стороны других тел не заставит его изменить состояние движения.

Свойства тел сохранять состояние покоя или равномерного, прямолинейного движения называется инерцией.

Из I закона Ньютона следует, что изменение скорости движения тела возможно лишь при воздействии на него других тел.

Системы отсчёта, в которых выполняется первый закон Ньютона, называются инерциальными. Любая система отсчёта, относительно которой материальная точка (тело) движется равномерно и прямолинейно, есть *инерциальная система*.

Основные величины, рассматриваемые в динамике поступательного движения: сила и масса.

Сила – мера воздействия на данное тело со стороны других тел или полей, вследствие которого возникает либо ускорение, либо деформация тела, т.е. сила F является мерой воздействия.

Если на тело действует несколько сил, то их действие эквивалентно действию одной силы, равной векторной сумме всех сил:

$$\vec{F}_{рез} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots + \vec{F}_n = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i, \quad (2.1)$$

где $F_{рез}$ – результирующая всех сил.

В СИ сила измеряется в Ньютонах (Н).

Известны четыре основных (фундаментальных) типа взаимодействия:

1. *Гравитационные взаимодействия* (источник – масса), подчиняются закону всемирного тяготения:

$$F_{гп} = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad (2.2)$$

где $\gamma = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$ – гравитационная постоянная, m_1 и m_2 – массы тел, r – расстояние между ними.

2. *Электромагнитные взаимодействия* (источник – заряд), подчиняется закону Кулона – Лоренца:

$$\vec{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^3} \vec{r} + q [\vec{v} \vec{B}] \quad (2.3)$$

где $k = 9 \cdot 10^9 \text{ м/Ф}$ – коэффициент пропорциональности.

3. *Ядерные взаимодействия* осуществляются между частицами ядра атома (источником являются нуклоны: протоны и нейтроны).

4. *Слабые взаимодействия*, проявляющиеся при превращении элементарных частиц друг в друга с участием нейтрино. Соотношение величин взаимодействия: ядерное – 1, электромагнитное – 10^{-2} , слабое – 10^{-13} , гравитационное – 10^{-38} .

В классической механике рассматриваются малые скорости. Поэтому масса считается величиной постоянной для данного тела. В релятивистской механике рассматриваются скорости близкие к скорости света, тогда согласно формуле (3.7) следует, что масса – величина переменная. По мере увеличения скорости масса m увеличивается.

В СИ масса измеряется в килограммах (кг).

II закон Ньютона – основной закон динамики поступательного движения. Ускорение, приобретаемое телом, прямо пропорционально действующей на тело силе и обратно пропорционально массе этого тела:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m} \quad (2.12)$$

Ускорение тела зависит не только от величины воздействия, но и от свойств самого тела (массы). Ускорение, приобретаемое телом под действием силы, направлено в ту же сторону, что и сама сила. Таким образом, II закон Ньютона объединяет 3 физические величины: массу, силу и ускорение.

В механике большое значение имеет *принцип независимости действия сил*: если на материальную точку действует одновременно несколько сил, то каждая из этих сил сообщает материальной точке ускорение согласно второму закону Ньютона, как будто других сил не было. Согласно этому принципу силы и ускорения можно разлагать на составляющие, использование которых приводит к существенному упрощению решения задач. Например, *нормальное* и *тангенциальное ускорения* материальной точки определяются соответствующими составляющими силы.

Сила, сообщающая материальной точке *нормальное* ускорение, направлена к центру кривизны траектории и потому называется *центростремительной силой*.

III закон Ньютона позволяет обобщить и применить законы Ньютона не для материальной точки, а для тел и системы тел. При взаимодействии тел возникают силы, равные по величине, направленные вдоль одной линии и приложенные к разным телам:

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}, \quad (2.13)$$

где \vec{F}_{12} – сила действия первого тела на второе, \vec{F}_{21} – сила действия второго тела на первое.

Из третьего закона Ньютона следует, что сумма внутренних воздействий в замкнутой системе равна нулю, а значит, система тел может получить ускорение только за счет внешних воздействий. Для движущейся системы так же справедлив второй закон Ньютона, только если система движется равномерно, прямолинейно и со скоростью, много меньшей скорости света.

1.2.2 Импульс тела. Закон сохранения импульса в изолированной системе

Импульс \vec{P} – векторная физическая величина, равная произведению массы этого тела на скорость:

$$\vec{P} = m \vec{v} \quad (2.14)$$

$$\vec{F} = m \vec{a} = m \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d(m\vec{v})}{dt}$$

Согласно второму закону Ньютона

Поскольку:

$$\vec{P} = m \vec{v} \Rightarrow \vec{F} = \frac{d\vec{P}}{dt} \quad (2.15)$$

Таким образом, сила равна скорости изменения импульса (более общая формулировка второго закона Ньютона).

$$\frac{M}{с}$$

В СИ импульс тела измеряется в

Совокупность материальных точек (тел), рассматриваемых как единое целое, называется *механической системой*.

Силы, с которыми на материальные системы действуют внешние тела, называются *внешними*.

Механическая система тел, на которую не действуют внешние силы, называется *изолированной*.

Производная по времени от импульса механической системы равна геометрической сумме внешних сил, действующих на систему:

$$\frac{d\vec{P}}{dt} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n \quad (2.16)$$

где $\vec{P} = \sum_{i=1}^n m_i \vec{v}_i$ – импульс системы.

$$\sum_{i=1}^n \vec{F}_i = 0 \Rightarrow \frac{d\vec{P}}{dt} = 0$$

В случае отсутствия внешних сил (изолированная система)

$$\vec{P} = \sum_{i=1}^n m_i v_i = 0 \quad (2.17)$$

Соотношение (2.13) выражает закон сохранения импульса. В изолированной системе геометрическая сумма импульсов всех тел есть величина постоянная. Данный закон носит универсальный характер и является фундаментальным законом природы.

3. Механическая работа, энергия, мощность.

Пусть под действием постоянной силы F материальная точка (тело) B , совершила перемещение S .

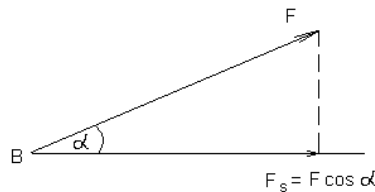


Рис. 7

F_s – движущая сила, составляющая силы F .

Для характеристики перемещающего действия силы вводится понятие *работы*.

Механической работой называется скалярная величина, равная произведению постоянной движущей силы на величину перемещения:

$$A = F_s \cdot S = F \cdot S \cdot \cos \alpha \quad (5.1)$$

Работа силы при 0° положительна, т.е. сила вызывает перемещение тела; при 90° отрицательна, т.е. сила препятствует движению тела.

Если $\alpha = 90^\circ$, то в этом случае сила не совершает работы по перемещению тела, а если направление силы и перемещения совпадают $\alpha = 0^\circ \Rightarrow A_{\max} = F \cdot S$.
В СИ единицей измерения работы является Джоуль (Дж).

5.2. Работа переменной силы

В случае переменной силы и криволинейного пути необходимо разбить весь путь S на столь малые (практически прямолинейные) отрезки $\Delta S_1, \Delta S_2 \dots \Delta S_n$, чтобы силы, действующие на каждом из них, можно было считать постоянными и равными $F_1, F_2 \dots F_n$.

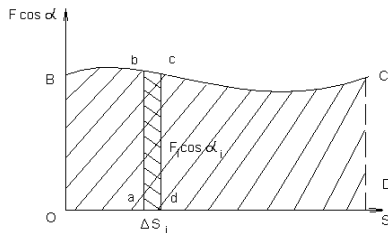


Рис. 8

Полная работа на всем пути:

$$A = \sum_{i=1}^n F_i \Delta S_i \cos \alpha_i \quad (5.2)$$

Или полная работа определяется площадью фигуры OBCD. Если путь OD разбит на бесконечно малые отрезки dS_i , то сумма, стоящая в правой части (5.2) переходит в интеграл:

$$A = \int_O^{OD} F dS \cos \alpha \quad (5.3)$$

5.3. Мощность

Чтобы охарактеризовать скорость совершения работы, вводят понятие *мощности*.

Мощность – физическая величина, характеризующая степень интенсивности выполнения работы.

Мощность определяется отношением работы к промежутку времени, за которое она совершена:

$$N = \frac{A}{t} \quad (5.4)$$

В случае движения тела с постоянной скоростью v под действием силы F (преодолевающей сопротивление движению) мощность N может быть выражена:

$$N = \frac{F \Delta S}{\Delta t} = Fv \quad (5.5)$$

В СИ единицей измерения мощности является ватт (Вт).

§6. Энергия. Кинетическая и потенциальная энергия. Связь энергии с работой

6.1. Энергия

Энергия – универсальная мера различных форм движения и взаимодействия. Энергия характеризует состояние системы, (возможность) системы к совершению работы при переходе из одного состояния в другое. Энергия является однозначной функцией состояния системы, её выражают через параметры состояния этой системы. Сколько видов движения – столько видов энергии (биологическая, химическая, ядерная энергии и т.д.). Понятие работы и энергии не адекватны: энергия – функция состояния, а работа – способ изменения энергии систем.

. Кинетическая энергия

Кинетическая энергия механической системы – это энергия механического движения этой системы:

$$E_k = \frac{mv^2}{2} \quad (5.6)$$

E_k зависит только от массы и скорости тела, т.е. кинетическая энергия системы есть функция состояния её движения. В свою очередь E_k зависит от выбора системы отсчёта (в разных ИСО, E_k различна). Кинетическая энергия только положительна.

6.3. Потенциальная энергия.

6.3.1. Потенциальная энергия сжатой пружины.

Потенциальная энергия – это энергия, определяемая взаимным расположением тел или частей тела относительно друг друга (энергия координаты). Рассмотрим сжатую пружину. Под действием внешней силы растянем пружину, при этом совершится работа против сил упругости $F_y = -k \Delta x$ – Закон Гука.

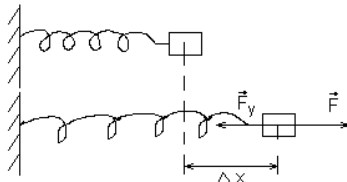


Рис. 9

$$A = \int_1^2 F_y dx = - \int_1^2 kx dx = -k \int_1^2 x dx = -\frac{kx^2}{2}$$

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

Таким образом E_n – потенциальная энергия сжатой пружины или энергия упругой деформации (E_n определяется координатой x).

$$A = E_{n1} - E_{n2} = -\Delta E_n \quad (6.1)$$

Формула (5.7) выражает связь энергии с работой, т.е. изменение энергии измеряется работой, которую может совершить система, переходя из одного состояния в другое. Работа – мера изменения энергии системы.

6.3.2. Потенциальная энергия гравитационного взаимодействия

Пусть тело массой m находится в гравитационном поле тела массой M .

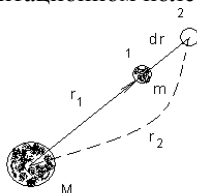


Рис. 10

$$F = \gamma \frac{mM}{r^2}$$

На тело m действует сила , которая изменяется с расстоянием. Если тело

переместится из точки 2 в точку 1, то совершится работа:

$$A = \int_1^2 F dr = \int_1^2 \gamma \frac{mM}{r^2} dr = \gamma mM \int_1^2 \frac{dr}{r^2}$$

$$\Rightarrow A = \gamma \frac{mM}{r_2} - \gamma \frac{mM}{r_1} = -\Delta E_n \quad (6.2)$$

Таким образом, потенциальная энергия тела m в поле тела M определяется формулой вида

$$E_n = \gamma \frac{mM}{r}$$

Проанализируем полученную формулу:

- 1) Работа не зависит от формы пути, зависит от начальной и конечной точки перемещения;
- а) Если работа не зависит от формы пути, такие системы называются *потенциальными* или *консервативными*. Действующие в них силы называются потенциальными. В таких системах не происходит перехода механической энергии в другие виды энергии;
- б) Системы, в которых работа зависит от формы пути, называются *диссипативными*, в таких системах существует переход механической энергии в другие виды энергии;

- в) Если в любой точке рассматриваемого пространства на тело действует сила, то говорят, что имеем дело с силовым полем. Если силы направлены к общей точке, то поле называют *центральным*;
 г) Если силы в данной области пространства одинаковы по величине и направлению, поле называют *однородным* (такovým является гравитационное поле около Земли);
 д) Если потенциальная энергия постоянна по времени, то поле называется *стационарным*.
 2) Работа равна разности энергии тела в двух точках поля.

Общим для всех видов потенциальной энергии является ее связь с работой потенциальных сил. Применяя связь работы и энергии можно рассчитывать поля и действующие в них силы (электрическое, гравитационное, магнитное поле).

В СИ единицей измерения энергии является Джоуль (Дж).

Область измерения энергии в Дж:

Вспышка сверхновой звезды	10^{40} Дж
Энергия, излучаемая солнцем в год	10^{32} Дж
Сильное землетрясение	10^{20} Дж
Водородная бомба	10^{16} Дж
Молния	10^8 Дж
Смертельная доза рентген	10^4 Дж
Химическая связь	10^{-20} Дж

4. Динамика вращательного движения.

Твёрдое тело мы рассматриваем как систему n материальных точек, при $n \rightarrow \infty$.

Абсолютно твёрдым телом называется тело, в котором при движении взаимное расположение точек не изменяется.

В кинематике мы ввели понятие: угловая скорость, угловое ускорение. Результат действия силы при вращательном движении зависит от величины силы, а так же от точки приложения и направления действия силы. Поэтому для описания действия силы вводится понятие *момента силы*.

8.2. Момент силы

Моментом силы называется величина, равная векторному произведению радиус – вектора, проведенного в точку приложения силы на вращающую силу:

$$\vec{M} = [\vec{r} \cdot \vec{F}] \quad (8.1)$$

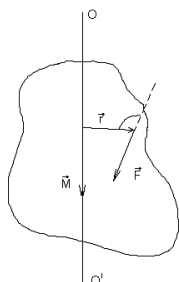


Рис. 11

\vec{M} – псевдовектор, его направление совпадает с направлением поступательного движения правого винта при его вращении от \vec{r} к \vec{F} . Векторы, направления которых связываются с направлением вращения, называются *псевдовекторами* или *аксиальными* векторами. Эти векторы не имеют определенных точек приложения: они могут откладываться из любой точки оси вращения.

Под *вращающей силой* понимается проекция силы на касательную к окружности, вдоль которой двигается точка приложенной силы.

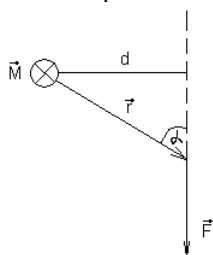


Рис. 12

Таким образом:

$$M = F \cdot r \cdot \sin \alpha = F \cdot d \quad (8.2)$$

d – плечо силы, есть кратчайшее расстояние от оси вращения до линии действия силы. Чтобы найти плечо силы необходимо опустить перпендикуляр от оси вращения на линию действия силы. В СИ единицей измерения момента силы является $H \cdot m$.

8.3. Основное уравнение динамики вращательного движения

Рассмотрим абсолютно твердое тело, вращающееся вокруг оси OO' . Разобьём твёрдое тело на элементарные массы m_i .

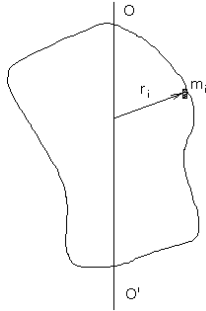


Рис. 13

Запишем второй закон Ньютона для массы m_i : $F_i = m_i a_i$. Заменяем $a_\tau = [\beta r]$ и умножим обе части уравнения на r_i – текущую координату: $r_i \cdot F_i = m_i \beta [r_i r_i]$, здесь $[F \cdot r_i] = M_i$. Обозначим, $m_i r_i^2 = I_i$, то получим $M_i = [I_i \cdot \beta]$.

Величина равная произведению массы материальной точки на квадрат расстояния её до оси вращения называется *моментом инерции материальной точки* $m_i r_i^2 = I_i$.

Чтобы перейти к твёрдому телу необходимо такие уравнения записать для всех точек,

составляющих это тело и просуммировать все уравнения $\sum_{i=1}^n \vec{M}_i = \sum_{i=1}^n I_i \cdot \beta$ величина,

$\sum_{i=1}^n M_i = M_{рез}$ – результирующий момент сил. I – момент инерции твёрдого тела равен сумме моментов инерций всех материальных точек тела:

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n = m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2 + \dots + m_n r_n^2$$

То момент силы равен произведению момента инерции тела на его угловое ускорение:

$$M = I \cdot \beta \quad (8.3)$$

Уравнение (8.3) называется *основным уравнением динамики вращательного движения*. Во

вращательном движении $\beta = \frac{M}{I}$ – второй закон Ньютона для вращающегося твёрдого тела. Роль силы играет момент сил. Мерой инертности твердого тела вращательного движения является момент инерции.

8.4. Момент инерции твёрдого тела. Способы его вычисления.

Момент инерции твёрдого тела находится, как сумма моментов инерции всех материальных точек из которых состоит тело:

$$I = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2 \quad (8.4)$$

В случае непрерывного распределения масс (тело правильной геометрической формы) эта сумма сводится к интегралу:

$$I = \int_V r^2 dm \quad (8.5)$$

Момент инерции тела зависит от массы тела и распределения этой массы вокруг оси вращения.

Пример 2. Момент инерции диска.

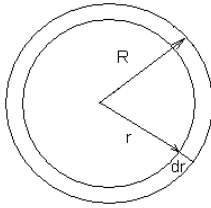


Рис. 15

Разделив диски на отдельные кольца толщиной dr , проинтегрировав по переменному радиусу, получим:

$$I_0 = \frac{1}{2} MR^2 \quad (8.7)$$

Если ось вращения проходит не через центр вращения тела, то можно применять теорему Штейнера:

$$I = I_0 + md^2 \quad (8.11)$$

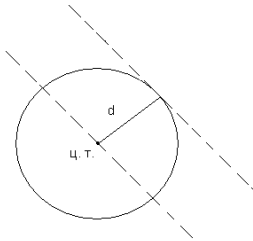


Рис. 16

Теорема Штейнера: Момент инерции, относительно оси, не проходящей через центр тяжести, равен сумме момента инерции относительно оси, проходящей через центр тяжести и произведению массы тела на квадрат расстояния между осями.

Если тело неправильной геометрической формы, то момент инерции можно найти косвенным

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{mgr}}$$

путём: используя закон сохранения энергии; период колебания физического маятника и т.д..

§9. Момент импульса. Закон сохранения момента импульса. Кинетическая энергия вращающегося тела. Полная кинетическая энергия тела. Аналогия формул поступательного и вращательного движений.

9.1. Момент импульса. Закон сохранения момента импульса.

Уравнение динамики вращательного движения можно записать в другом виде

$$\vec{M} = I \cdot \vec{\beta} = I \frac{d\vec{\omega}}{dt} \Rightarrow \vec{M} = \frac{d(I\vec{\omega})}{dt} \quad \text{. Величина } I\vec{\omega} \text{ , равная произведению момента}$$

инерции на его угловую скорость называется *моментом импульса*. Момент импульса обладает очень важной особенностью – в изолированной системе сумма моментов импульсов всех тел есть величина постоянная

$$\sum_{i=1}^n M_i = 0 \Rightarrow \quad (\text{закон сохранения момента импульса}). \text{ Если система изолированная, то}$$

$$\sum_{i=1}^n I_i \omega_i = \text{const} \quad (9.1)$$

Уравнение (9.1) есть закон сохранения момента импульса.

Причем $I\vec{\omega}$ – величина векторная и неизменными остаётся не только величина момента импульса, но и его направление.

9.2. Кинетическая энергия вращающегося тела. Кинетическая энергия катящегося тела.

Рассмотрим абсолютно твёрдое тело, вращающегося с угловой скоростью ω (см. рис. 13). Все точки тела вращаются с одинаковой угловой скоростью и обладают кинетической энергией. *Кинетическая энергия вращающегося тела* складывается из кинетической энергии всех материальных точек:

$$E_k = \sum_{i=1}^n E_i = \sum_{i=1}^n \frac{m_i v_i^2}{2} = \sum_{i=1}^n \frac{m_i \omega_i^2 r_i^2}{2} = \frac{\omega}{2} \sum_{i=1}^n m_i r_i^2 \Rightarrow$$

$$E_k = \frac{I\omega^2}{2} \quad (9.2)$$

9.3. Кинетическая энергия катящегося тела

Если тело одновременно участвует в поступательном и вращательном движениях, то его кинетическая энергия равна сумме кинетических энергий поступательного движения и вращения (например, цилиндр, скатывающийся с наклонной плоскости без скольжения):

$$E_k = \frac{mv^2}{2} + \frac{I\omega^2}{2} \quad (9.3)$$

Данное положение учитывают при решении многих практических задач.

9.4. Аналогия формул поступательного и вращательного движения

поступательное движение	вращательное движение
S, \vec{v}, \vec{a}	$\phi, \vec{\omega}, \vec{\beta}$
m, \vec{F}, \vec{P}	I, \vec{M}, \vec{L}
$\vec{F} = m \vec{a}$	$\vec{M} = I \vec{\omega}$
$\vec{P} = m \vec{v}$	$\vec{L} = I \vec{\omega}$
$\sum_{i=1}^n m_i \vec{v}_i = const$	$\sum_{i=1}^n I_i \vec{\omega}_i = const$
$E_k = \frac{mv^2}{2}$	$E_k = \frac{I\omega^2}{2}$

5. Механические колебания и волны.

Самые распространенные виды движений, встречающиеся в природе и в технике это повторяющиеся движения: возвратно-поступательно движется поршень двигателя внутреннего сгорания, раскачиваются стволы и листья деревьев от ветра, чередуются приливы и отливы в морях и океанах, движется кровь по сосудам и т.д. Во всех этих случаях тело или система тел многократно отклонялось от своего состояния равновесия, вновь возвращаются к нему. Такие движения называются *колебательными*.

Гармоническим называется такое колебание, когда колеблющаяся величина изменяется во времени по закону синуса или косинуса с постоянной амплитудой и частотой. Во всех остальных случаях колебания будут негармоническими.

Среди других видов колебаний, гармонические колебания занимают особое положение. Это обусловлено тем, что, как показал Фурье, любое периодическое движение (любое колебание) можно рассмотреть как результат сложения конечного или бесконечного числа простых гармонических колебательных движений. Таким образом, сколько угодно сложное колебание может быть сведено к гармоническому, поэтому учение о гармонических колебаниях составляет основу общего учения о колебаниях.

§10. *Гармоническое колебательное движение и его характеристики. Маятники (пружинный, математический, физический). Полная энергия гармонического колебания.*

10.1. Гармоническое колебательное движение и его характеристики.

Согласно определению, при гармонических колебаниях смещение колеблющейся точки изменяется по закону синуса или косинуса:

$$x = A \sin(\omega t + \phi_0) \quad (10.1)$$

где x – смещение колеблющейся точки;

A – амплитуда колебания, т. е. наибольшее смещение колеблющейся точки от положения равновесия;

ω – круговая (циклическая) частота;

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (10.2)$$

T – период колебаний (время одного полного колебания);

$$T = \frac{1}{\nu} \quad (10.3)$$

ν – обычная частота (число колебаний в единицу времени).

Подставляя (10.3) в (10.2) получим:

$$\omega = 2\pi\nu \quad (10.4)$$

Формула (10.4) выражает связь циклической частоты с обычной частотой. В СИ ν измеряется в герцах (Гц).

$(\omega t + \phi_0)$ – фаза колебания; величина, определяющая положение колеблющейся точки и направление её движения в данный период времени;

ϕ_0 – начальная фаза;

Скорость колеблющейся точки величина переменная. Она может быть определена как первая производная смещения по времени:

$$v = \frac{dx}{dt} = A\omega(\cos(\omega t + \phi_0)) \quad (10.5)$$

Ускорение колеблющейся частицы первая производная скорости по времени:

$$a = \frac{dv}{dt} = -A\omega^2 \sin(\omega t + \phi_0) = -\omega^2 x \quad (10.6)$$

На рис. 17 приведены графики координаты, скорости и ускорения тела, совершающего гармонические колебания.

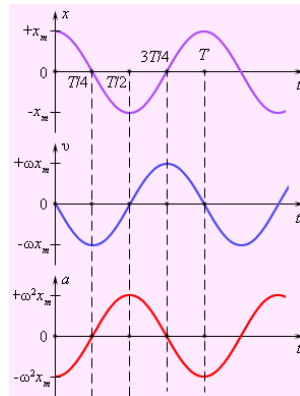


Рис. 17

10.2. Динамика колеблющейся точки

Любое колебательное движение происходит с ускорением. Причина ускорения сила и тогда получаем: $F = ma = m\omega^2 x = -kx$.

Таким образом, при гармонических колебаниях возвращающая сила пропорциональна смещению x . Если колебание совершается под действием упругой силы, то колебания называются *упругими* и коэффициент $k = m\omega^2$ называется *коэффициентом упругости или жёсткости*. Если возвращающая сила неупругая, то колебания называются *квазиупругими*, а коэффициент k называют *коэффициентом квазиупругости*.

М а я т н и к и

10.2.1. *Пружинный маятник* – это груз массой m , подвешенный на абсолютно упругой пружине и совершающий гармонические колебания.

$$F_y = -kx$$

$$k = m\omega^2 \Rightarrow \omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

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

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (10.7)$$

Формула (10.7) – период колебаний пружинного маятника. Период колебаний пружинного маятника зависит от свойств самой системы. Амплитуда будет зависеть от энергии, сообщённой этому маятнику.

10.2.2. Математический маятник – материальная точка, подвешенная на невесомой, нерастяжимой нити, способная совершать колебания в поле тяжести Земли.

$$mg \sin \alpha = F_{\text{с}}$$

$$mg \sin \alpha = -kx = F_{\text{с}}$$

$$\frac{mgx}{l} = -kx \Rightarrow k = \frac{mg}{l}$$

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

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \quad (10.8)$$

Формула (10.8) – период колебаний математического маятника.

Из формулы (10.8) следует, что:

1. Период колебания маятника не зависит от амплитуды и массы маятника.
2. Период колебания зависит от длины маятника и ускорения свободного падения.

Следует отметить, что плоскость колебания маятника в пространстве сохраняется.

10.2.3. Физический маятник – это твердое тело, совершающее колебания под действием силы тяжести относительно горизонтальной оси.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}} \quad (10.9)$$

$$L = \frac{I}{mr}$$

Где $L = \frac{I}{mr}$ – приведенная длина физического маятника. Приведенная длина физического маятника равна длине такого математического маятника, у которого период колебаний такой же, как и у

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{y}{mgr}}$$

физического маятника.

10.3. Полная энергия гармонического колебания

Энергия тела массой m , колеблющегося под действием упругой силы в любой момент складывается

$$E_{\text{к}} = \frac{mv^2}{2} \quad \text{и} \quad E_{\text{п}} = \frac{kx^2}{2}, \quad \text{т.е.}$$

из кинетической энергии

и потенциальной

, т.е.

$$E_n = \frac{mv^2}{2} + \frac{kx^2}{2}$$

Заменим

$$v = A\omega(\cos + \phi_0)$$

и

$$x = A \sin(\omega t + \phi_0)$$

, а также

учитывая, что $k = m\omega^2$ получим:

$$E_n = \frac{mA^2\omega^2 \cos^2 \omega t}{2} + \frac{mA^2\omega^2 \sin^2 \omega t}{2} = \frac{kA^2}{2} \quad (10.10)$$

$$E_n = \frac{kA^2}{2} = \frac{m\omega^2 A^2}{2} \quad (10.11)$$

Таким образом, *полная энергия гармонического колебания* зависит от квадрата амплитуды колебаний и квадрата круговой частоты. Полная энергия остается постоянной, т.к. при гармонических колебаниях справедлив закон сохранения и превращения механической энергии.

§11. *Свободные, затухающие и вынужденные колебания. Резонанс. Сложение гармонических колебаний.*

11.1. Свободные колебания

Если в системе, совершающей колебания, только однажды сообщили энергию, то такие колебания будут *свободными*.

В отсутствии сил трения на систему будет действовать только возвращающая сила и колебания будут гармоническими.

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -kx \quad (11.1)$$

(11.1) дифференциальное уравнение свободных колебаний.

Необходимые условия для возникновения свободных колебаний:

1) Наличие энергии, избыточной по сравнению с энергией системы, в положении устойчивого равновесия;

2) Работа сил трения в системе должна быть значительно меньше избыточной энергии.

В отсутствии этих условий колебания быстро затухают или не возникают вообще.

11.2. Затухающие колебания

В реальных системах из-за наличия сил трения колебания будут *затухающими*. В результате помимо возвращающей силы действует также и силы трения.

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -kx - r \frac{dx}{dt} \quad (11.2)$$

(11.2) – дифференциальное уравнение затухающих колебаний, решение этого уравнения позволяет получить формулу смещения для затухающих колебаний:

$$x = A_0 e^{\delta t} \sin \omega t \quad (11.3)$$

где x – смещение; A_0 – начальная амплитуда; e – основание натурального логарифма; δ – коэффициент затухания, t – время.

Быстрота уменьшения амплитуды характеризуется декрементом затухания δ . Декремент затухания – величина, показывающая быстроту затухания амплитуды и равная отношению двух соседних амплитуд разделённых временем в один период:

$$k = \frac{A(t)}{A(t+T)} \quad K = \frac{A_1}{A_2} \quad (11.4)$$

$$\lambda = \ln k \quad (11.5) \quad \lambda = \ln K$$

(11.5) – логарифмический декремент затухания. Если колебания полностью затухают за время, равное одному периоду, то такие колебания называются *апериодическими*. Связь между декрементом и коэффициентом затухания: $K = e^{-\delta T}$

$$\lambda = \delta T \quad (11.6)$$

Коэффициент затухания зависит от массы и сопротивления среды:

$$\delta = \frac{r}{2m} \quad (11.7)$$

11.3. Вынужденные колебания. Резонанс.

Наряду со свободными колебаниями, происходящими под действием внутренних сил, в системе возможны колебания, вызванные периодической внешней силой.

Вынужденные колебания – колебания, происходящие под действием *периодической внешней силы*. Дифференциальное уравнение движения при вынужденных колебаниях, без учёта сил трения:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -kx + F_0 \sin \omega_e t \quad (11.8)$$

Проводя соответствующие преобразования, получаем решение данного уравнения:

$$x = \frac{F_0}{m(\omega_0^2 + \omega_e^2)} \sin \omega_e t \quad X = \frac{f_0}{m(\omega_0^2 + \omega_B^2)} \sin \omega_B t \quad (11.9)$$

$$A_{рез} = \frac{F_0}{m(\omega_0^2 + \omega_в^2)} \quad A_{рез.} = \frac{f_0}{m(\omega_0^2 + \omega_в^2)} \quad (11.10)$$

Из уравнения видно, что вынужденные колебания совершаются с частотой, равной частоте действия вынуждающей силы и с амплитудой, зависящей от соотношения частоты действующей силы и собственной частоты колебания системы.

Если в системе существует силы трения то:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -kx + F_0 \sin \omega_в t - F_{тр.} \quad (11.11)$$

$$\frac{m d^2 x}{dt^2} = -KX + f_0 \sin \omega_в t - F_{тр.}$$

И тогда:

$$A_{рез} = \frac{F_0}{m \sqrt{(\omega_0^2 - \omega_в^2)^2 + 4 \delta \omega^2}} \quad (11.12)$$

$$A_{рез.} = \frac{f_0}{\sqrt{m^2 (\omega_0^2 - \omega_в^2)^2 + 4 \delta \omega^2}}$$

Резкое возрастание амплитуды при приближении частоты действия вынуждающей силы к частоте собственных колебаний системы называется *резонансом*.

Резонансная частота – это некоторое значение частоты вынуждающей силы, при которой амплитуда колебаний достигает максимального значения:

$$\omega_p = \sqrt{\omega_0^2 - 2 \delta^2} \quad (11.13)$$

§12. Волны в упругой среде. Уравнение бегущей волны. Звуковые волны.

12.1. Волны в упругой среде.

Процесс распространения колебаний в среде называется *волновым процессом*. При волновом процессе происходит передача энергии колебаний от точки к точке, но без переноса вещества. В среде возникают вынужденные колебания с частотой равной частоте колебаний источника. Область ограниченная этим процессом называется волновой областью. Геометрическое место точек, до которых доходят колебания к моменту времени t называется *волновой поверхностью* или *фронтом волны*. На фронте волны все точки имеют одинаковые фазы колебаний. Линия, вдоль которой распространяется волна, называется *лучом*. Луч всегда перпендикулярен фронту волны. Волны бывают *поперечные* и *продольные*. Если колебания совершаются перпендикулярно направлению волны, то волны называются поперечными. Если колебания совершаются вдоль направления распространения волн, то такие волны называются продольными.

Скорость волны:

$$v = \frac{\lambda}{t} \quad (12.1)$$

здесь λ – длина волны, расстояние, на которое волна сместится за время равное одному периоду T .

Если колебания сложные, то вводят понятие *групповой* и *фазовой* скорости.

Фазовая скорость – это скорость, с которой движется фаза суммарного колебания.

Групповая скорость – это скорость перемещения пакета сложного колебания.

12.2. Уравнение бегущей волны.

Узнать, как колеблется каждая точка волновой области можно с помощью уравнения волны.

$$x = A \sin \left(\omega t - \frac{\omega y}{v} \right) = A \sin \left(\omega t - \frac{2 \pi y}{T v} \right) \quad (12.2)$$

$$x = A \sin \left(\omega t - \frac{2 \pi y}{\lambda} \right) \quad (12.3)$$

$$x = A \sin (\omega t - k y) \quad (12.4)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

где λ называется *волновым числом*.

Все записи уравнений (12.2), (12.3), (12.4) однозначны и называются *уравнениями бегущей волны*.

Интенсивность волны – это количество энергии переносимой волной через единичную площадку

расположенную нормально к лучу за единицу времени $I \sim kA^2$, $Y \sim KA^2$

Для волнового процесса присуще: отражение, преломление, дифракция (огибание препятствий), интерференция (наложение волн).

Особый интерес представляет наложение 2-х волн, бегущей и отражённой от поверхности. В некоторых случаях возникают *стоячие волны* (если на длине замкнутого пространства уложить целое число полуволн). В стоячей волне колебания всех точек не изменяются во времени.

Уравнение стоячей волны:

$$x = 2A \cos \frac{2\pi y}{\lambda} \sin \omega t \quad (12.5)$$

12.3. Звуковые волны

Звуковые волны – это механические колебания, возникающие в средах. Звуковые волны бывают: периодические (музыкальные звуки), шумы, звуковые удары.

Человек слышит звуковые колебания в диапазоне 20 – 20000 Гц. Колебания ниже 20 Гц – инфразвуки. Колебания выше 20000 Гц – ультразвуки.

Психофизические характеристики звука:

- 1) Тембр – спектральный состав, звуковых колебаний.
- 2) Высота звука – определяется частотой колебания.
- 3) Громкость – зависит от амплитуды и частоты колебания.

6. Элементы механики жидкостей.

Элементы механики жидкостей

Гидродинамика – раздел механики, в котором изучают движение жидкостей и явления, происходящие при движении в жидкости твёрдых тел.

В отличие от твёрдого тела в жидкости возможны значительные смещения составляющих её частиц относительно друг друга. Поэтому жидкость благодаря текучести, может принимать форму того сосуда, или русла в котором она находится или движется.

Говоря о реальной жидкости можно сказать, что:

- 1) Реальная жидкость сжимаема: её объём уменьшается, а плотность увеличивается с повышением давления. Все жидкости в той или иной степени сжимаемы, но их сжимаемость незначительна. НАПРИМЕР: при повышении давления от 10^5 до 10^7 Па (1-100 атм) плотность воды увеличивается всего лишь на 0,5 %. Конечно, при движении жидкостей по трубам или в открытых руслах, таких больших перепадов обычно не возникает. Поэтому при рассмотрении многих законов гидродинамики сжимаемостью жидкостей можно пренебречь
- 2) Реальная жидкость вязкая: при движении жидкости между отдельными частицами всегда возникают силы внутреннего трения, или силы вязкости. Однако, если силы внутреннего трения малы по сравнению с другими действующими в ней силами (внешнего давления, силы тяжести и т.п.), то ими можно пренебречь и считать жидкость невязкой.

Воображаемую жидкость не обладающую ни сжимаемостью, ни вязкостью называют *идеальной жидкостью*.

Такой жидкости в природе естественно нет. Но коэффициент вязкости таких жидкостей как вода, ацетон, спирт, эфир относительно невелик при температуре выше 0°C . Поэтому течение таких жидкостей во многих практически очень важных случаях можно рассматривать практически идеальным.

Для идеальной жидкости важно выполнение двух условий:

- 1) $\rho = \text{const}$
- 2) $\eta = 0$

13.2. Основные понятия механики жидкостей

Поток – совокупность движущихся частиц жидкости. В связи с тем, что в жидкости движется огромное количество частиц, исследование каждой отдельной частицы практически неосуществимо. В гидродинамике используется метод исследования потока предложенный Л. Эйлером. В 1773 году Эйлер получает дифференциальные уравнения движения невязкой жидкости, в основу которых заложен совершенно новый метод исследования теоретической механики, ориентированный на решение задач динамики не твёрдого тела, а жидкости.

Линия тока - это линия, касательная, к которой в любой точке определяет скорость жидкости. Линии тока можно наблюдать, если в поток жидкости выпускать тонкие струйки краски. Последние, двигаясь вместе с частицами жидкости, имеют те же скорости, что и сама жидкость, а значит, дают картину распределения линий тока.

Движение жидкости называется *установившимся (стационарным)*, если все величины: скорость, давление, плотность и т.д. остаются постоянными всё время в каждом месте пространства, занятого текущей жидкостью. В противном случае движение называется *неустановившимся*, и законы движения будут ещё сложнее.

Анализ картины стационарного течения значительно упростится, если мы выделим в движущейся жидкости объём, ограниченный линиями тока.

Поскольку линии тока не пересекаются, жидкость не может проходить через боковую поверхность этого объёма (ни внутрь объёма, ни из него), т.е. рассматриваемый объём подобен трубке с непроницаемыми для жидкости стенками. Поэтому, объём жидкости, ограниченный линиями тока, называется *трубкой тока*.

13.3. Уравнение неразрывности струи

$$Sv = \text{const} \quad (13.1)$$

Для данной трубки тока произведение площади поперечного сечения трубки на скорость течения жидкости есть величина постоянная. Соотношение (13.1) называется *уравнением неразрывности струи*. Оно справедливо не только для трубки тока, но и для любой реальной трубы, для русла реки и т.п. Таким образом форма трубки определяет скорость течения жидкости (газа): скорость возрастает там, где трубки тока сужаются, и, наоборот, падает там, где они расширяются.

ПРИМЕР: 1) скорость течения на узких участках речного русла больше, чем на широких и глубоких. 2) скорость воды в струе, вырывающейся из бранспойнта, больше чем в шланге и т.п.

Величина $Q = S \cdot v$, численно равная объёму жидкости, протекающей в единицу времени через поперечное сечение потока, называется *объёмным расходом жидкости*. Измеряется в м³/с.

Из формулы (13.1) следует, что расход жидкости в пределах потока постоянен.

§14. *Уравнение Бернулли и его применение. Давление жидкости, текущей по трубе переменного сечения. Формула Торричелли.*

14.1. Уравнение Бернулли и его применение

Давление покоящейся жидкости, создаваемое столбом её собственным весом, на глубине h равно:

$$P = P_0 + \rho gh \quad (14.1)$$

где P_0 – атмосферное давление

ρgh – давление столба жидкости.

Однако в движущейся жидкости возникает уже дополнительное давление, обусловленное кинетической энергией потока.

Уравнение, выведенное на основании закона сохранения энергии, устанавливает соотношение между величинами, характеризующими поток жидкости:

$$\frac{\rho v^2}{2} + \rho gh + P = \text{const} \quad (14.2)$$

Данное соотношение, выведенное в 1738 г. Даниилом Бернулли, называется *уравнением Бернулли*, для стационарного течения несжимаемой жидкости. Оно играет фундаментальную роль во всех гидродинамических исследованиях.

Физический смысл уравнения Бернулли, являющимся математическим выражением закона Бернулли, заключается в том, что полная энергия единицы объёма потока идеальной жидкости, в любом сечении потока есть величина постоянная.

Единицей измерения давления, как известно, является Па. Паскаль – давление, вызываемое силой 1 Н, равномерно распределённой на поверхности площадью 1 м².

$$\text{Па} = \text{Н/м}^2 = \text{Н} \cdot \text{м} / \text{м}^3 = \text{Дж} / \text{м}^3$$

Из приведённого преобразования единиц измерения давления в единицы удельной энергии (т.е. энергии единицы объёма) следует, что все величины левой части уравнения (14.2) можно также рассматривать как величины давления.

Величину P называют статическим давлением;

Величину $\frac{\rho v^2}{2}$ – динамическим давлением;

Величину ρgh – гидростатическим давлением.

Полное давление, равное сумме динамического, гидростатического и статического давлений в любой части потока остается постоянным.

14.2. Давление жидкости, текущей по трубе переменного сечения.

Для горизонтальной трубки тока (или реальной трубы) уравнение Бернулли принимает следующий вид:

$$\frac{\rho v^2}{2} + P = \text{const} \quad (14.3)$$

Из уравнения Бернулли и неразрывности струи следует, в местах сужения трубопровода скорость течения жидкости возрастает, а статическое давление понижается. Докажем это.

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{v_2}{v_1}$$

Поскольку $S_1 > S_2 \Rightarrow v_1 < v_2$ получаем, что $\frac{\rho v_1^2}{2} < \frac{\rho v_2^2}{2}$ согласно (14.3) $P_1 > P_2$.

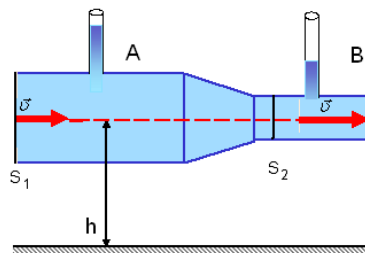


Рис. 25

Статическое давление $P_{ст}$ жидкости в горизонтальной трубе может быть измерено прямой манометрической трубкой 2 (см. рис. 26), плоскость отверстия которой расположена параллельно направлению движения жидкости. Динамическое давление $P_{дин}$ определяют по разности между полным и измеренным одновременно статическим давлением:

$$P_{дин} = P - P_{ст} \quad (14.4)$$

Для измерения полного давления применяют манометрическую трубку 1, изогнутую под прямым углом навстречу движения жидкости. Частицы жидкости, попадающие в отверстие трубки, затормаживаются до полной остановки, а их кинетическая энергия переходит в потенциальную, и давление в трубке повышается согласно уравнению Бернулли до величины полного давления. Если в струю жидкости или газа поставить рядом 2 манометрические трубки 1 и 2 (такое устройство называется *трубкой Пито*) и соединить их с манометром, то последний покажет динамическое давление, по которому вычисляют

$$P_{дин} = \frac{\rho v^2}{2} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2 P_{дин}}{\rho}}$$

скорость течения:

Уравнение Бернулли является одним из основных законов механики движения жидкостей и газов (гидро и аэродинамики) имеющим большое прикладное значение. На его основе сконструированы:

- 1) Водоструйный насос;
- 2) Гидротаран;
- 3) Пульверизатор.

1.2 Лекция №2 (2 ч)

Тема: Молекулярная физика и термодинамика

1.2.1 Вопросы лекции:

1. **Основы молекулярной физики.** Основные положения молекулярно-кинетической теории. Идеальный газ. Экспериментальные газовые законы. Уравнение Менделеева-Клайперона. Абсолютная температура. Внутренняя энергия идеального газа. Распределение Максвелла и Больцмана.

2. Основы термодинамики. Первое начало термодинамики. Теплота и работа как форма передачи энергии. Работа расширения газа. Уравнение Майера. Адиабатический процесс. Уравнение Пуассона. Обратимые и необратимые процессы. Круговые процессы. Цикл Карно и работа тепловых машин.

3. Основы термодинамики Второе начало термодинамики. КПД тепловых машин. Пути повышения по КПД. Понятие об энтропии и третьем начале термодинамики. Основы термодинамики биологических систем. Живой организм – открытая биологическая система. Энергетический баланс живого организма и его КПД. Преобразование энергии и кинетика физико-химических процессов в живых организмах.

4. Реальные газы и жидкости. Реальный газ. Энергия взаимодействия молекул, размеры молекул. Уравнение Ван-дер-Ваальса. Опыт Эндрюса. Фазовые переходы. Фазовые состояния, диаграмма состояния. Сжижение газов. Терморегуляция растений. Жидкости, поверхностное натяжение жидкости, испарения. Капиллярные явления. Формула Жюрена. Явления переноса в газах. Уравнение переноса. Диффузия. Теплопроводность. Вязкость. Диффузия через мембраны, осмос, осмотическое давление и его роль в жизнедеятельности растений.

1.2.2. Краткое содержание вопросов

В МКТ пользуются идеализированной моделью – *идеальный газ*

Идеальным принято считать газ, если:

- 1) Газ состоит из мельчайших частиц – молекул, находящихся в непрерывном хаотическом движении, зависящим от температуры;
- 2) Размеры молекул малы по сравнению с расстоянием между ними поэтому их считают материальными точками;
- 3) Взаимодействие молекул только при соударениях (абсолютно упругие соударения).

Газовые законы

Если параметры состояния не изменяются, то говорят, система находится в термодинамическом равновесии. Если изменяются параметры, то говорят совершается *термодинамический процесс*. Процесс, происходящий с данной массой газа при одном постоянном параметре — температуре, давлении или объеме называют *изопроцессом*. Многие процессы в газах, происходящие в природе и осуществляемые в технике, можно рассматривать приближенно как процессы, в которых изменяются лишь два параметра. Особую роль в физике и технике играют три процесса: изотермический, изохорный и изобарный.

1. *Закон Бойля – Мариотта*(изотермический процесс, $T = const$). Для данной массы газа при постоянной температуре произведение давления газа на его объем есть величина постоянная:

$$PV = const \quad (1.1)$$

На плоскости (p, V) изотермические процессы изображаются при различных значениях температуры T семейством гипербол $p \sim 1/V$, которые называются *изотермами*(см. рис. 1).

2. *Закон Гей - Люссака*(изобарный процесс, $P = const$). Объем данной массы газа при постоянном давлении изменяется линейно с температурой:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad (1.2)$$

На плоскости (V, T) изобарные процессы при разных значениях давления p изображаются семейством прямых линий, которые называются *изобарами*(см. рис. 1).

3. *Закон Шарля*(изохорный процесс, $V = const$). Давление данной массы газа при постоянном объеме изменяется линейно с температурой:

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} \quad (1.3)$$

На плоскости (p, T) изохорные процессы для заданного количества вещества ν при различных значениях объема V изображаются семейством прямых линий, которые называются *изохорами*(см. рис. 1).

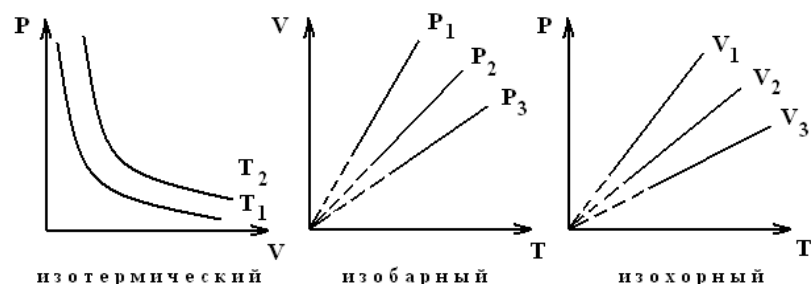


Рис. 1

4. *Закон Авогадро.* При равных давлениях и температурах в одинаковых объёмах содержится одинаковое число молекул. В одном моле различных веществ содержится одно и тоже число молекул – постоянная Авогадро

$$N_A = 6,023 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$$

5. *Закон Дальтона.* Давление газовой смеси равно сумме парциальных давлений газов входящих в смесь: $P_{\text{см}} = P_1 + P_2 + \dots + P_n$ (1.4)

Парциальное давление – это давление отдельного, газа, входящего в смесь.

§ 2. *Основное уравнение молекулярно-кинетической теории. Уравнение Менделеева – Клапейрона. Абсолютная температура.*

Среди большого хаоса в движении молекул можно выделить величины характеризующие комплекс большого числа молекул. К ним относятся средняя скорость движения всех молекул, средняя энергия движения молекул. Эти величины характеризуют комплекс системы, но не совпадают с параметрами отдельных молекул. Молекулярно – кинетическая теория связывает макропараметры (объём, давление, температура) с микропараметрами движения (d, m, \vec{v}, E и т.д.). Давление газа на стенки сосуда:

$$P = \frac{2}{3} n \bar{E}_k \quad (2.1)$$

где $n = \frac{N}{V}$ – концентрация молекул, т.е. число молекул в единице объёма газа;

$$\bar{E}_k = \frac{m \bar{v}_{\text{кв}}^2}{2} \quad \text{– средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул, } \bar{v}_{\text{кв}}^2$$

$$= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i^2 \quad \text{– квадрат средней квадратичной скорости молекул.}$$

(2.1) – *основное уравнение МКТ*, которое показывает, давление газа прямо пропорционально средней кинетической энергии поступательного движения молекул, содержащихся в единице объёма газа.

Температура – мера средней кинетической энергии газа (поступательного движения молекул):

$$T = \frac{2 \bar{E}_k}{3 k} \quad (2.2)$$

T является характеристикой большого числа молекул и понятие температуры одной молекулы не имеет смысла. T – абсолютная температура, выражаемая в Кельвинах.

T = 0 K – это та температура, при которой поступательное движение молекул должно замедляться. Такой температуры в природе не существует, хотя сколь угодно близкой к нулю может. Однако остаются еще колебательные и вращательные движения молекул.

Результаты, полученные на основании поведения вещества при T близких к нулю не укладываются в рамки классических представлений, а описываются квантовыми законами.

Основная идея квантовой механики – величины, описывающие поведение молекул; энергия, импульс – квантованы, т.е. могут принимать только определенные значения, могут изменяться не непрерывно, а отдельными порциями (квантами), вследствие этого появляются ряд таких явлений при T \rightarrow 0K, (сверхпроводимость, сверхтекучесть), которые не могут быть объяснены с точки зрения классической МКТ.

Уравнение состояния идеального газа. Уравнение Менделеева – Клапейрона.

$$P = nkT \quad (2.6)$$

(2.6) – уравнение состояния идеального газа.

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

$$P = \frac{N}{V} kT$$

В связи с неудобством подсчёта общего числа молекул, вводим величину ν – количество вещества.

$$\nu = \frac{N}{N_A} \cdot \frac{m}{\mu} = \frac{M}{\mu}$$

$$PV = \frac{M}{\mu} N_A kT$$

$N_A k = R$ – универсальная газовая постоянная, $R = 8,31 \text{ Дж/моль}\cdot\text{К}$. R численно равна работе, которую совершает 1 моль газа при изобарном нагреве на 1 К. В окончательном виде:

$$PV = \frac{M}{\mu} RT \quad (2.7)$$

В итоге мы получили *уравнение Менделеева – Клапейрона*. Данный закон обобщает экспериментальные газовые законы, и сам является экспериментальным.

§ 3. *Понятия о числе степеней свободы. Полная кинетическая энергия идеального газа. Внутренняя энергия идеального газа.*

Под *числом степеней свободы* (i) понимается число независимых координат определяющих положение тела в пространстве.

Пример. Если тело перемещается в пространстве совершенно произвольно, то это перемещение всегда можно составить из 6 одновременных независимых движений: трёх поступательных (вдоль трёх осей прямоугольной системы координат) и трёх вращательных (вокруг трёх взаимно перпендикулярных осей, проходящих через центр тяжести тела).

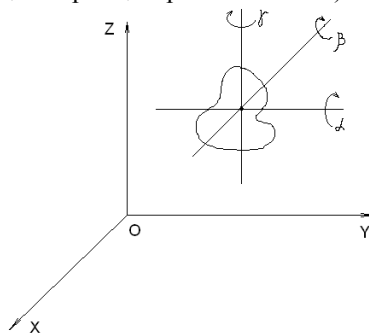


Рис. 5

Ввиду полной хаотичности движения молекул, все виды их движения (поступательные и вращательные) одинаково возможны (равновероятны).

Больцман доказал следующую теорему. Так как молекулы движутся беспорядочно и хаотично, то энергия по степеням свободы распределяется равномерно.

Энергия поступательного движения молекул идеального газа определяется по формуле:

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

Тогда согласно теореме Больцмана, энергия, приходящаяся на одну степень свободы:

$$E = \frac{1}{2} kT$$

А полная кинетическая энергия молекул идеального газа:

$$E = \frac{i}{2} kT \quad (2.8)$$

Полная кинетическая энергия молекулы газа пропорциональна его абсолютной температуре и зависит только от неё.

Для поступательного движения $i=3$. Вращательное движение так же описывается тремя степенями свободы. Для молекул идеального газа максимальное число степеней свободы: $i = 3_{\text{пост}} + 3_{\text{вр}} = 6$.

1) Если молекула одноатомная (O, N ...) то $i=3$ (молекула подобна материальной точке) \Rightarrow

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

2) Если молекула двухатомная (O₂, N₂ ...), то у неё нельзя не учитывать вращательную энергию (

$$E_{\text{полн}} = \frac{mv^2}{2} + \frac{I\omega^2}{2}$$

), т.е. момент инерции такой молекулы уже не равен нулю. Такая молекула имеет вид гантели. Для неё вращательное движение имеет смысл только в двух направлениях OX и OZ, вдоль оси Y (I=0), значит, двухатомная молекула имеет $i=3+2=5$ – пять степеней свободы \Rightarrow

$$E = \frac{5}{2} kT$$

3) Трёхатомная и многоатомная молекула (H₂O, N₂O ...) имеет 6 степеней свободы $i=6 \Rightarrow$

$$E = \frac{6}{2} kT = 3 kT$$

Внутренняя энергия идеального газа

Так как у идеального газа взаимодействие молекул учитывается, то внутренняя энергия идеального газа определяется только кинетической энергией всех молекул, т.е:

$$U = N \frac{i}{2} kT$$

$$N = \frac{M}{\mu} N_A$$

Поскольку

, то в окончательном виде получим:

$$U = \frac{i}{2} \frac{M}{\mu} RT \quad (2.9)$$

Внутренняя энергия идеального газа данной массы газа зависит только от температуры, а её изменение

$$\Delta U = \frac{i}{2} \frac{M}{\mu} R \Delta T$$

зависит от

$$\Delta U = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} R \Delta t$$

изменения температуры.

2.1.5 Понятия о числе степеней свободы. Полная кинетическая энергия молекул газа

Под *числом степеней свободы (i)* понимается число независимых координат, определяющих положение тела в пространстве.

Пример. Если тело перемещается в пространстве совершенно произвольно, то это перемещение всегда можно составить из 6 одновременных независимых движений: трёх поступательных (вдоль трёх осей прямоугольной системы координат) и трёх вращательных (вокруг трёх взаимно перпендикулярных осей, проходящих через центр тяжести тела) (рис. 2).

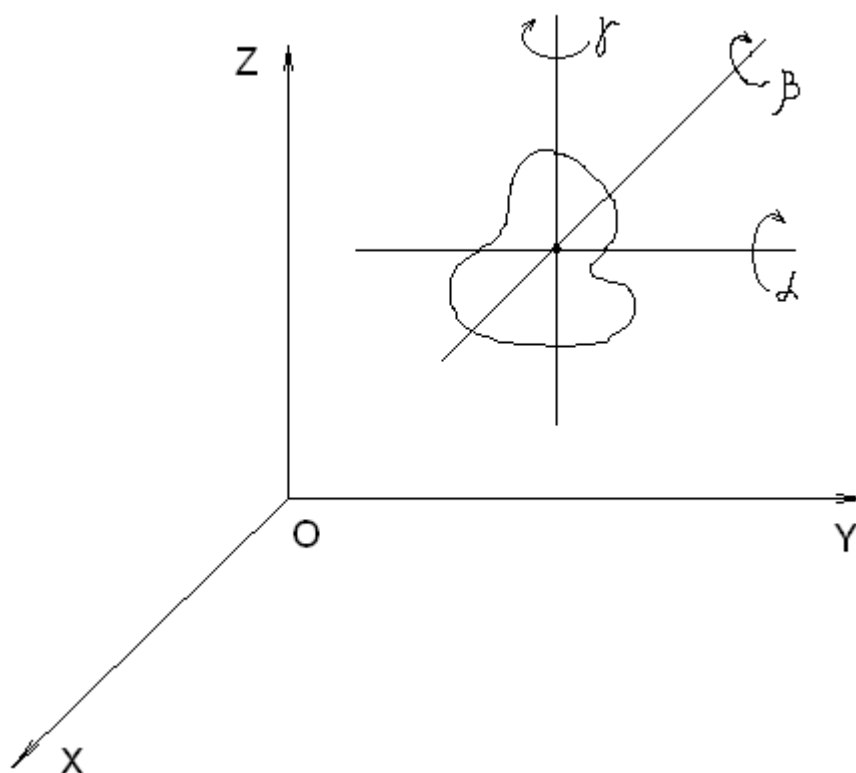


Рис. 2 – Число степеней свободы

Ввиду полной хаотичности движения молекул, все виды их движения (поступательные и вращательные) одинаково возможны (равновероятны).

Л. Больцман доказал следующую теорему: так как молекулы движутся беспорядочно и хаотично, то *энергия по степеням свободы распределяется равномерно*.

Энергия поступательного движения молекул идеального газа определяется по формуле:

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

Тогда согласно теореме Больцмана, энергия, приходящаяся на одну степень свободы:

$$E = \frac{1}{2} kT$$

А полная кинетическая энергия молекул идеального газа:

$$E = \frac{i}{2} kT \quad (1.12)$$

Полная кинетическая энергия молекул газа пропорциональна его абсолютной температуре и зависит только от неё.

Таблица 4 – Число степеней свободы для идеального газа

Число степеней свободы	Одноатомный газ	Двухатомный газ	Многоатомный газ
Поступательных	3	3	3
Вращательных	-	2	3
Всего	3	5	6

4) Если молекула одноатомная ($O, N \dots$), то $i = 3$ (молекула подобна материальной точке) \Rightarrow

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

5) Если молекула двухатомная ($O_2, N_2 \dots$), то у неё нельзя не учитывать вращательную энергию (

$$E_{\text{полн}} = \frac{mv^2}{2} + \frac{I\omega^2}{2}$$

), т.е. момент инерции такой молекулы уже не равен нулю. Такая молекула имеет вид гантели. Для неё вращательное движение имеет смысл только в двух направлениях OX и OZ , вдоль оси

$$E = \frac{5}{2} kT$$

$OY (I = 0)$, значит, двухатомная молекула имеет $i = 3 + 2 = 5$ – пять степеней свободы \Rightarrow

6) Трёхатомная и многоатомная молекула ($H_2O, N_2O \dots$) имеет 6 степеней свободы $i=6 \Rightarrow$

$$E = \frac{6}{2} kT = 3 kT$$

2.1.6 Внутренняя энергия идеального газа

В общем случае *внутренняя энергия* складывается из кинетической энергии хаотического движения молекул, потенциальной энергии их взаимодействия, внутриатомной и внутриядерной энергии. Например, у солнца кинетическая и потенциальная энергии не изменяются, а энергия выделяется за счёт внутренней энергии ядер и атомов. Поскольку у идеального газа взаимодействие молекул не учитывается, то внутренняя энергия идеального газа определяется только кинетической энергией всех молекул, т.е.:

$$U = N \frac{i}{2} kT$$

Поскольку $N = \frac{M}{\mu} N_A$, то в окончательном виде получим:

$$U = \frac{i}{2} \frac{M}{\mu} RT \quad (1.13)$$

Внутренняя энергия любой массы газа пропорциональна числу степеней свободы, абсолютной температуре и массе газа.

Внутренняя энергия идеального газа данной массы газа зависит от температуры, а её изменение

$$\Delta U = \frac{i}{2} \frac{M}{\mu} R \Delta T \quad \text{обуславливается} \quad \Delta U = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} R \Delta t \quad \text{изменением температуры.}$$

2.1.7 Закон Максвелла о распределении молекул идеального газа по скоростям

Изучая поведение большого числа хаотически движущихся частиц (к ним относятся и молекулы идеального газа) и используя законы статистики, Максвелл предложил формулу, с помощью которой можно определить относительное число молекул имеющих скорость, меняющееся в определенном интервале скоростей от

v до $v + \Delta v$ ΔN

$$\frac{\Delta N}{\Delta v} = 4\pi N \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} \exp[-mv^2/2kT] v^2 \quad (1.14)$$

Эту зависимость $\frac{\Delta N}{\Delta v}$ от v можно представить графически (рис. 3).

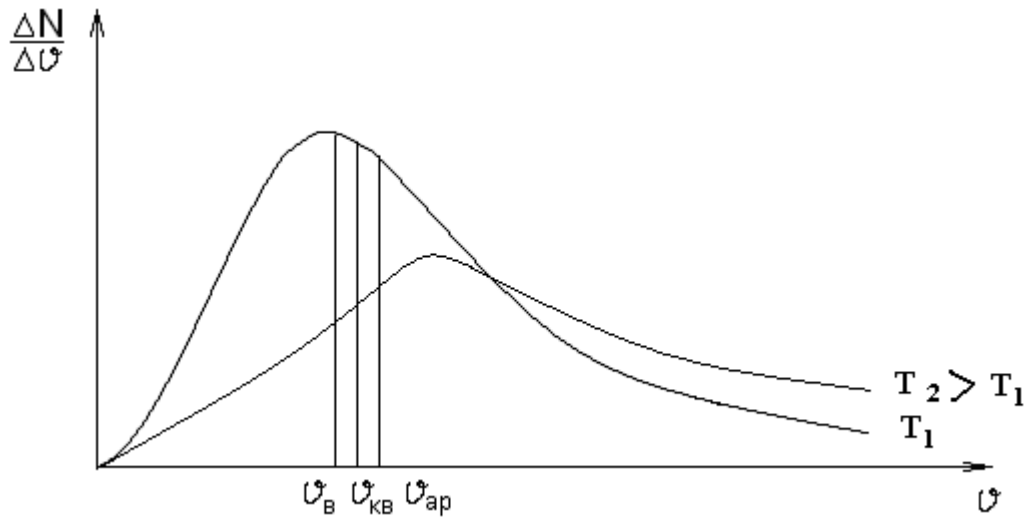


Рис. 3 – Распределение Больцмана

Анализ формулы и графика позволяет заключить:

- 1) Мало молекул, имеющих скорость близких к нулю и очень большие скорости.
- 2) Большинство молекул движутся с определённой скоростью, на графике эта скорость соответствует

$$v_{\text{вер}} = \sqrt{\frac{2kT}{m}} = \sqrt{\frac{2RT}{\mu}}$$

максимуму кривой и называется *наиболее вероятной скоростью*, т.е.

$$\frac{m v_{\text{вер}}^2}{2KT} = 1, \text{ т.е. } v_{\text{вер}} = \sqrt{\frac{2KT}{m}} = \sqrt{\frac{2RT}{\mu}}$$

- 3) Площадь, ограниченная под кривой соответствует общему числу молекул в данной массе газа.
- 4) При увеличении температуры максимум смещается в сторону больших скоростей и делается менее выраженным.
- 5) График несимметричен относительно экстремальной точки, так как кривая с осью v при больших скоростях не пересекается и лишь экспоненциально приближается к ней, т.е. ограничений в величине очень больших скоростей нет (этим, к примеру, объясняется и испарение при любой температуре).

2.1.8 Скорости газовых молекул

1. *Наиболее вероятная скорость* – скорость, которой обладает большинство молекул в данной массе газа:

$$v_{\text{вер}} = \sqrt{\frac{2kT}{m}} = \sqrt{\frac{2RT}{\mu}} \quad (1.15)$$

2. *Средняя арифметическая скорость* $v_{\text{ар}} = \frac{v_1 + v_2 + \dots + v_n}{n}$, из формулы Максвелла эта величина определяется, как:

$$v_{\text{ар}} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi \mu}} \quad (1.16)$$

$$v_{\text{кв}}^2 = \frac{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_n^2}{n}$$

3. *Средняя квадратичная скорость*

Её можно рассчитать, используя понятие энергии одной молекулы:

$$\frac{m v_{\text{кв}}^2}{2} = \frac{3}{2} kT \Rightarrow v_{\text{кв}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}} \quad (1.17)$$

2.1.9 Барометрическая формула

Если на систему большого числа молекул, хаотически движущихся, накладывается внешнее силовое поле, например, атмосфера Земли или планет, то возникает зависимость числа частиц от потенциальной энергии. Рассмотрим газ в потенциальном поле Земли (рис. 4). Из уравнения Менделеева–Клапейрона плотность газа:

$$\rho = \frac{m}{v} = \frac{P\mu}{RT}$$

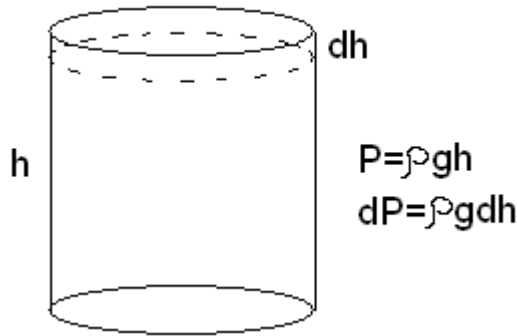


Рис. 4 – Газ в потенциальном поле Земли

Изменение давления $dP = \rho g dh$, а значит:

$$dP = \frac{P\mu}{RT} g dh$$

$$\frac{dP}{P} = \frac{\mu g}{RT} dh$$

Считаем, что температура газа $T = \text{const}$.

Проинтегрируем и пропотенцируем полученную формулу:

$$\frac{P_0}{P} = e^{-\frac{mgh}{kT}} \Rightarrow P = P_0 e^{-\frac{mgh}{kT}}, \quad (1.18)$$

здесь P_0 – давление на нулевом уровне; P – давление на высоте h .

Выражение (1.18) называется *барометрической формулой*. Данная формула позволяет найти атмосферное давление в зависимости от высоты или, измерив давление, найти высоту. Из (1.18) следует, что давление с высотой уменьшается по экспоненциальному закону.

Используя формулу $P = nkT$, можно получить распределение числа молекул в потенциальном поле.

$$n = n_0 e^{-\frac{mgh}{kT}}$$

$$n = n_0 e^{-\frac{E_n}{kT}} \quad (1.19)$$

Выражение (1.19) называется *распределением Больцмана*. Обычно газ (система) находится в силовом поле и поэтому они подчиняются закону Максвелла–Больцмана.

2.3 Основы термодинамики

Термодинамика изучает качественные и количественные закономерности превращения энергии в различных процессах, обусловленных тепловым движением молекул.

В основу термодинамики положены два начала (два закона) термодинамики.

1. *Первый закон термодинамики* – закон сохранения и превращения энергии в тепловых процессах: внутреннюю энергию тела можно изменить посредством сообщения этой системе количества теплоты и совершения над ней (или самой системой) работы:

$$\Delta U = Q - A \quad (1.1)$$

$$\rightarrow A = Q - \Delta U$$

$$Q = \Delta U + A \Rightarrow A = Q - \Delta U \quad (1.2)$$

Если система периодически возвращается в исходное состояние, то изменение её внутренней энергии равно нулю $\Rightarrow A = Q$. Из этого закона вытекает, что нельзя построить такую машину, которая работала бы без получения энергии из вне. Такая машина называлась бы *вечным двигателем I-го рода*.

Количество теплоты

Количество теплоты Q – это количество энергии отданное, или принятое телом (системой). Передача тепловой энергии возможна: конвекцией, излучением, теплопроводностью.

$$Q = C m \Delta T \quad (1.3)$$

Теплоемкость тела C – количество теплоты, необходимое для нагревания данной массы вещества на 1 Кельвин. Можно ввести понятие *удельной теплоемкости* $C_{уд}$ – это количество теплоты, необходимое для нагревания единицы массы вещества на 1 Кельвин.

$$C_{уд} = \frac{Q}{m \Delta T} \quad (1.4)$$

Существует понятие *мольной теплоемкости* C_{μ} – количество теплоты, необходимое для нагревания одного моля вещества на 1 Кельвин.

$$C_{\mu} = \frac{Q}{\frac{m}{\mu} \Delta T} \quad (1.5)$$

Внутренняя энергия

Внутренняя энергия U – это энергия всех частей, входящих в данную систему. Внутренняя энергия идеального газа:

$$\Delta U = \frac{i}{2} \frac{M}{\mu} R \Delta T \quad (1.6)$$

1) Внутренняя энергия однозначно определяется параметрами состояния $\Rightarrow U$ является функцией состояния;

2) Изменение внутренней энергии ΔU не зависит от процесса перехода, а определяется лишь начальным и конечным состоянием.

3) В замкнутом процессе изменение внутренней энергии равно нулю $\oint dU = 0$.

4) Аддитивность.

Далеко не все функции являются функциями состояния, примером такой функции является работа A .

Работа

Работу A , совершаемую при газовых процессах, можно рассчитать следующим образом.

Пусть мы имеем газ под поршнем с площадью основания поршня S . Объем газа V . Если сообщить газу энергию Q , то он, нагреваясь, должен расширяться так, что его объем увеличится на ΔV .

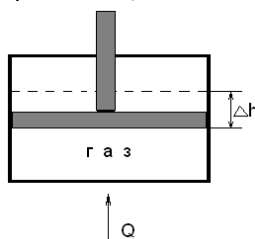


Рис. 8

$$\begin{aligned}
 \text{Работа} \quad A &= \int_1^2 F dh, \text{ так как } F = PS, \Rightarrow A = \int_1^2 PS dh = \int_1^2 P dV \\
 A &= \int_1^2 P dV
 \end{aligned} \quad (1.7)$$

В случае если $P = \text{const}$:

$$A = P \Delta V \quad (1.8)$$

Работа зависит от процесса перехода, т.е. является функцией процесса.

§ 3. Адиабатический процесс. Уравнение Пуассона. Коэффициент Пуассона.

Адиабатический процесс – это процесс без теплообмена с внешней средой, т.е. $\delta Q = 0$.

Способы получения:

- 1) Хорошая тепловая изоляция;
- 2) Быстрое протекание процесса, т.к. чем быстрее протекает процесс, тем быстрее успевает происходить теплообмен. $Q=0$.

Согласно первому закону термодинамики: $dU = \delta Q + \delta A$, поскольку $\delta Q = 0$:

$$dU = \delta A \quad (3.1)$$

Внутренняя энергия меняется только за счёт совершения работы.

Опыт с «воздушным огнём». Возьмём сосуд с толстыми стенками из оргстекла, чтобы не происходил теплообмен. На дно положим ватку, смоченную легко воспламеняющейся жидкостью. При резком сжатии ватка воспламеняется, поскольку температура резко увеличивается. По такому же принципу основывается работа дизельного двигателя.

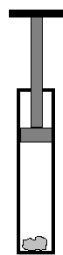


Рис. 9

$$PV^\gamma = \text{const} \quad (3.2)$$

Выражение (3.2) называется уравнением Пуассона. Величина равная отношению $\gamma = \frac{C_P}{C_V} = \frac{i+2}{i}$ называется коэффициентом Пуассона.

Изобразим в одной системе координат PV два процесса: изотермический и адиабатический.

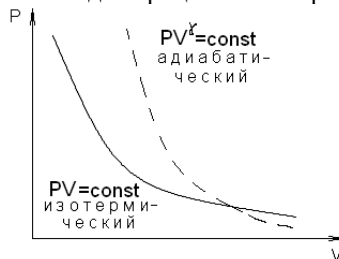


Рис. 10

При адиабатическом процессе давление изменяется в большее число раз, чем при изотермическом процессе. Адиабата идёт круче, чем изотерма, поскольку при адиабатическом сжатии $P \uparrow$ не только за счёт $\downarrow V$, но и за счёт увеличения температуры.

§ 4. Тепловые машины. Цикл Карно. Второе начало термодинамики.

Тепловая машина – это устройство, которое тепловую энергию трансформирует механическую (или наоборот). Любая тепловая машина состоит из рабочего тела, нагревателя и холодильника.

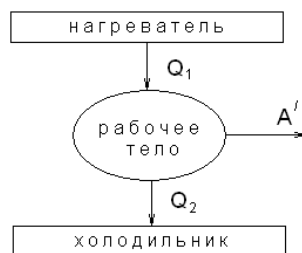


Рис. 11

Q_1 – количество теплоты за один цикл. Рабочее тело часть этого тепла использует на работу, а часть

тепла Q_2 бесполезно теряется ($\frac{Q_2}{Q_1}$ – коэффициент бесполезного действия). Коэффициент полезного действия реальной тепловой машины:

$$\eta = \frac{A'}{Q_1} = \frac{|Q_1| - |Q_2|}{|Q_1|} \quad (4.1)$$

§ 5. Круговые процессы. Необратимые и обратимые процессы

Если система, проходя ряд состояний, возвращается в исходное состояние, то говорят, что совершен *круговой процесс (цикл)*.

Цикл называется **прямым**, если за цикл совершается положительная работа (работа против внешних сил). Цикл называется **обратным**, если за цикл совершается отрицательная работа.

Прямой цикл используется в **тепловых двигателях** (совершают работу за счет полученной извне теплоты). Обратный цикл используется в **холодильных машинах** (за счет работы внешних сил теплота переносится к телу с более высокой температурой).

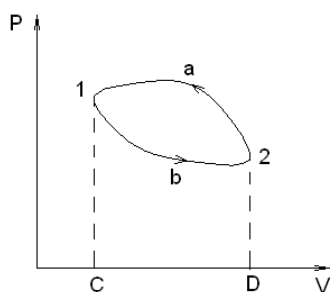


Рис. 12 – Круговой процесс

Графически работа, совершенная при таком процессе будет выражаться площадью фигуры 1a2b.

$$A = \int_1^2 PdV$$

$$A_{1a2b1} = A_{c1a2dc} - A_{c1b2ac}$$

Таким образом, **работа** – это **функция не только состояния термодинамической системы, но и вида процесса**, который происходит. Поэтому **работа не является однозначной функцией состояния** (такой, как внутренняя энергия). Из первого начала термодинамики следует, что **теплота Q** , так же как и работа **A** , является **функцией процесса**, который происходит с системой.

Реальные газы – это те газы, в которых нельзя не учитывать размеры молекул и взаимодействия между ними.

Размеры молекул $d=10^{-10}$ м, а взаимодействие их проявляются лишь при высоких давлениях. Так, при давлении 150-120 атм. (давление в газовых баллонах), газы можно считать идеальными. При сжижении аммиака $P=500$ атм., при взрыве атомной бомбы $P=1000$ атм., газ уже не может считаться идеальным.

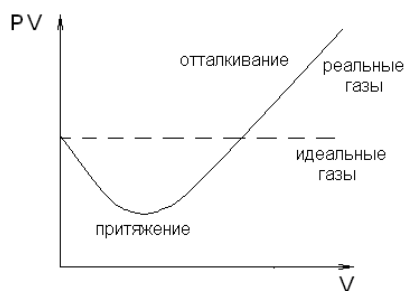


Рис. 14

В области малого давления PV меньше чем нужно для идеального газа за счёт меньшего объёма. При малых давлениях преобладают силы взаимного притяжения, газ занимает меньший объём и кривая идёт ниже. В области большего давления преобладают силы отталкивания, газ занимает больший объём и кривая идёт выше.

Существует несколько моделей для реального газа и соответственно несколько уравнений состояний.

Одно из самых простых предложено Ван – дер – Ваальсом в 1873 году, взяв за основу уравнение состояния идеального газа:

$$PV = \frac{M}{\mu} RT$$

Ввел поправки, учитывающие размеры молекул и их взаимодействие:

- 1) Так как молекулы имеют собственный объем, то объем пространства будет меньше у реального газа в сравнении с идеальным:

$$V = V_{\mu} - 4 N_A V^i \quad (6.1)$$

Здесь V_{μ} – объем одного моля идеального газа, N_A – число Авогадро, V^i – объем одной молекулы, $b = 4 N_A V^i$ – поправка на объём, занимаемый самими молекулами.

- 2) Из-за взаимодействия молекул реальный газ испытывает дополнительное давление, называемым *внутренним давлением* P^i . Избыточное давление P^i зависит от числа молекул, а значит от плотности газа и при этом обратно пропорционально объёму:

$$P^i = \frac{a}{V_{\mu}^2} \quad (6.2)$$

Здесь a – поправка, характеризующая взаимодействие молекул.

С учетом поправок уравнение состояния 1 моля реального газа принимает вид:

$$\left(P + \frac{a}{V_{\mu}^2} \right) (V_{\mu} - b) = RT \quad (6.3)$$

(6.3) называется *уравнением Ван-дер-Ваальса* для 1 моля газа.

Уравнение состояния реального газа любой массы имеет вид:

$$\left(P + \frac{M^2}{\mu^2} \frac{a}{V^2} \right) \left(V - \frac{M}{\mu} b \right) = \frac{M}{\mu} RT \quad (6.4)$$

Здесь a и b – постоянные Ван дер-Ваальса (для разных газов они различны).

Это уравнение оказалось полезным не только для описания состояния газа при больших давлениях, оно также объясняет переход пара в жидкость.

Изотермы Ван-дер-Ваальса и экспериментальные изотермы Эндрюса

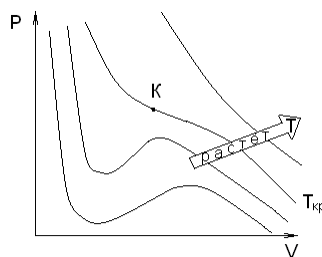


Рис. 15

На рисунке 15 представлены теоретические изотермы Ван – дер – Ваальса. Точка перегиба K называется критической точкой, т.е. переход газа в жидкость (или наоборот) осуществляется мгновенно. Критическая температура $T_{кр}$ – это максимальная температура, при которой вещество ещё может оставаться

жидким. В критической точке и не газ и не жидкость, а вещество в особом состоянии. При $T > T_{кр}$ никаким сжатием газ нельзя перевести в жидкое состояние. При температурах выше $T_{кр}$ изотермы реального газа похожи на изотермы идеального газа.

В 1861 – 1869 гг. Т. Эндрюс проводил опыты по сжижению CO_2 . Он исследовал ход изотерм углекислоты при различных температурах и на основании этих исследований ввёл понятие критической температуры для CO_2 и она оказалась равной $31^\circ C$ (304 K). До этой температуры изотермы имели вид гиперболы, что соответствовало изотермам идеального газа. Ниже 304 K на изотермах углекислоты появляются горизонтальные участки, на которых изотермическое сжатие газа приводит к его конденсации, но не к увеличению давления. Т. е. сжатый газ можно превратить в жидкость только если его температура ниже критической.

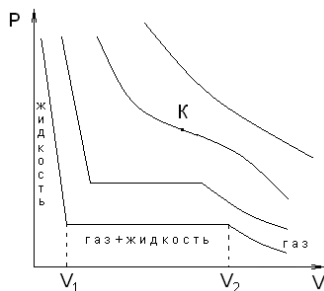


Рис. 16

Начиная с V_1 , в сосуде появится жидкость, часть газа сконденсируется. И чем меньше V, тем больше жидкости. При V_2 весь газ перейдет в жидкость. Поскольку жидкость мало сжимаема, то кривая идет круто вверх. При больших температурах конденсация начнется раньше, а закончится позже.

§ 7. Свойства жидкостей. Поверхностное натяжение и свободная энергия поверхности жидкости. Давление под искривлённой поверхностью жидкости. Формула Лапласа.

По внешним признакам жидкость занимает промежуточное положение между газами и твёрдыми телами. Газы не обладают ни формой, ни объёмом. Твёрдые тела имеют и то и другое. Поскольку сила притяжения ослабла в жидкости, молекулы в них в отличие от молекул твердого тела подвижны, поэтому жидкость не сохраняет свою форму – она обладает свойством текучести.

При постоянной температуре средняя кинетическая энергия молекул всюду одинакова, однако потенциальная энергия одинакова только для молекул (1) внутри жидкости. Частицы поверхностного слоя (2) обладают повышенным запасом потенциальной энергии.

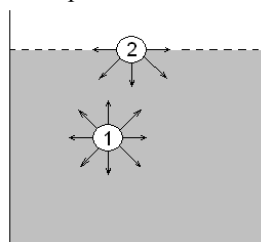


Рис. 17

Вследствие этого они стремятся уйти внутрь объема жидкости, что приводит к особому состоянию поверхностного слоя жидкости (она подобно растянутой упругой пленке) – *состояние поверхностного натяжения*.

Разность энергии поверхностного слоя и энергии тех же молекул внутри жидкости называется *свободной энергией поверхностного слоя*.

$$\Delta W = \alpha \Delta S \quad (7.1)$$

Здесь α – коэффициент поверхностного натяжения; ΔS – изменение площади поверхности.

Из-за наличия поверхностного натяжения на границе жидкость – твердое тело появляются силы поверхностного натяжения, стремящиеся сохранить поверхность неизменной:

$$F = \alpha \cdot l \quad (7.2)$$

Здесь l – длина контура, ограничивающего поверхность жидкости. Коэффициент поверхностного натяжения α численно равен работе, которую нужно совершить, чтобы при постоянной температуре, изменить площадь поверхностного слоя на 1 м^2 :

$$\alpha = \frac{\Delta A}{\Delta S} = \frac{\Delta W}{\Delta S} \quad (7.3)$$

$$[\alpha] = \text{Дж/м}^2 = \text{Н/м}$$

Коэффициент поверхностного натяжения зависит от рода жидкости, температуры (с увеличением температуры α уменьшается) и от примесей. Вещества, уменьшающие коэффициент поверхностного натяжения при добавлении их в жидкость, называются поверхностно – активными. Из-за наличия сил поверхностного натяжения жидкость стремится принять такую форму, чтобы была минимальной поверхность. Так в свободном состоянии жидкость принимает форму шара.

1.3 Лекция №3 (2 ч)

Тема: Электростатика. Постоянный электрический ток

1.3.1 Вопросы лекции:

1. **Электростатика.** Электрический заряд и его свойства. Закон сохранения зарядов. Поле точечного заряда. Поле диполя. Напряженность поля и его поток. Первое уравнение Максвелла. Работа, перемещение заряда в электрическом поле. Второе уравнение Максвелла. Потенциал. Связь напряженности с потенциалом. Энергия совокупности зарядов. Емкость. Энергия электростатического поля. Изменение поля при внесении в него диэлектрика.

2. **Постоянный электрический ток.** Постоянный ток. Понятие о токе проводимости. Сила и плотность тока. Сторонние силы. ЭДС. Сопротивление проводника. Сверхпроводимость. Закон Ома в дифференциальной и интегральной формах. Соединение проводников.

3. **Работа и мощность тока.** Работа тока, мощность. Закон Джоуля - Ленца. Проводники, полупроводники и диэлектрики. Зависимость сопротивления полупроводников от температуры. Полупроводниковые приборы. Применение электроэнергии в сельском хозяйстве.

1.3.2 Краткое содержание вопросов

Электростатика изучает взаимодействие и условия равновесия *покоящихся* электрически заряженных тел, а также свойства этих тел, обусловленные электрическими зарядами [1].

Ещё в глубокой древности было известно, что янтарь, потертый о шерсть, притягивает легкие предметы [2]. Английский врач Джильберт (конец XVI в.) назвал тела, способные после натирания притягивать легкие предметы, назлектризованными. Сегодня мы говорим, что тела при этом приобретают *электрические заряды*.

Свойства электрических зарядов

1. Существуют заряды двух типов – положительные и отрицательные.
2. Заряд квантуется. Частицы несущие минимальные электрические заряды: электроны и протоны.
3. В изолированной системе алгебраическая сумма электрических зарядов остается постоянной.
4. Заряды взаимодействуют друг с другом и их взаимодействие подчиняется закону Кулона.
5. Аддитивность.
6. Все вещества по своим электрическим свойствам можно разделить на три типа:
 - а) Проводники – вещества в которых всегда имеются свободные заряды (металлы, растворы солей и электролиты).
 - б) Диэлектрики – вещества, которые не проводят электрический ток. В них нет свободных зарядов, есть только связанные. В диэлектриках невозможно перемещение зарядов (пока не наступит пробой диэлектрика).
 - в) Полупроводники – вещества, проводимость которых резко зависит от внешних условий (температура, освещенность, наличие примесей). Проводимость полупроводников может осуществляться как свободными, так и связанными зарядами. Наличие и концентрации зарядов в полупроводнике зависит от внешних факторов.

3.1.1 Электрическое поле. Закон Кулона.

Напряженность электрического поля

Электрические заряды могут взаимодействовать друг с другом. Величину взаимодействия можно определить по закону Кулона.

Два точечных заряда взаимодействуют друг с другом с силой прямо пропорциональной величинам (q) этих зарядов и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними (r^2).

$$F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2} \quad (1.1)$$

В СИ $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ ($\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{м}}$ – диэлектрическая постоянная) для вакуума.

Величина, показывающая во сколько раз сила взаимодействия зарядов в данной среде меньше, чем в вакууме называется диэлектрической проницаемостью данной среды ϵ . Таким образом закон Кулона для среды:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} \quad (1.2)$$

F – центральная сила. Направлена вдоль линии, соединяющей центры зарядов.

В векторной форме закон Кулона:

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} \cdot \frac{\vec{r}}{r} \quad (1.3)$$

$\frac{\vec{r}}{r}$ – единичный вектор.

Данная запись закона Кулона позволяет определить направление силы.

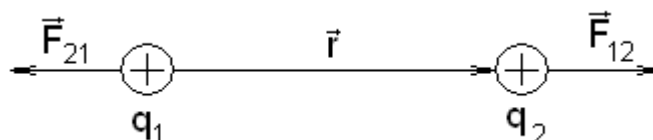


Рис. 1 – Взаимодействие зарядов

В СИ заряд измеряется в кулонах $1 \text{ Кл} = 1 \text{ А} \cdot \text{с}$.

Взаимодействие зарядов осуществляется посредством электрических полей, окружающих заряды.

Электрическое поле – особый вид материи, окружающей заряды проявляющиеся в том, что в любой его точке на заряд оказывается силовое воздействие. Мы будем рассматривать электрические поля, которые создаются *неподвижными* зарядами и называются *электростатическими*.

Для описания электростатического поля вводятся две характеристики: напряженность электрического поля (E) и потенциал (φ).

Если в любую точку поля поместить заряд, то на него будет действовать сила, причем эта сила будет расти, если увеличивать величину заряда. Однако отношение силы F действующей на заряд к его величине будет постоянной.

Величина, равная отношению силы действующей на заряд к величине помещаемого заряда в данную точку, называется *напряженностью электростатического поля*.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad (1.4)$$

Напряженность является векторной, силовой характеристикой электростатического поля.

За направление вектора напряженности \vec{E} принято направление силы, действующей на положительный единичный заряд.

Направление вектора напряженности \vec{E} совпадает с направлением вектора силы \vec{F} .

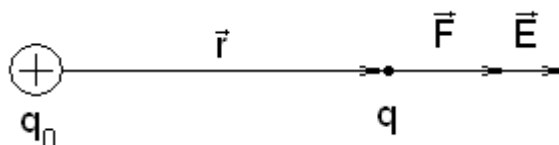


Рис. 2 – Направление вектора напряженности

Напряженность в СИ измеряется в $\frac{\text{Н}}{\text{Кл}}$.

Физическая скалярная величина, определяемая потенциальной энергией единичного положительного заряда, помещенного в данную точку поля, называется *потенциалом данной точки*.

$$\varphi = E_n / q \quad (1.5)$$

Потенциал является скалярной, энергетической характеристикой электростатического поля.

Потенциал в СИ измеряется в Вольтах (В)

$$1 \text{ В} = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ Кл}}$$

Таким образом, 1 Вольт потенциал такой точки электростатического поля в которой заряд в 1 Кл обладает энергией 1 Дж.

3.1.2 Напряженность поля точечного заряда и диполя. Принцип суперпозиции полей

По определению напряженность данной точки электростатического поля численно, равна отношению силы действующей на пробный заряд к величине этого пробного заряда:

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

Если поле образовано одним зарядом, то сила F может быть определена из закона Кулона:

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

Тогда напряженность поля точечного заряда определится как (см. рис. 2):

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \cdot \frac{q_0 \cdot q_{\square}}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \cdot \frac{q_0}{r^2} \quad (1.6)$$

Рассмотрим электростатическое поле, созданное не одним, а двумя зарядами $+q$ и $-q$, находящимися на расстоянии ℓ друг от друга. Найдем напряженность поля в точке A .

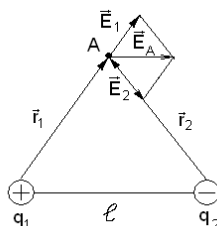


Рис. 3 – Электростатическое поле, созданное двумя зарядами

Из рисунка 3 видно, что \vec{E}_A равна векторной сумме \vec{E}_1 и \vec{E}_2 :

$$\vec{E}_A = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 \quad (1.7)$$

Простейшим примером системы двух зарядов является диполь. Диполь система двух разноименных, но равных зарядов, находящихся друг от друга на расстоянии ℓ много меньше чем r , где ℓ - плечо диполя.

Многие молекулы подобны диполю: молекула воды H_2O , молекула соляной кислоты HCl .

Напряженность поля диполя равна векторной сумме напряженностей полей, созданных положительными q_1 и отрицательными зарядами q_2

$$\vec{E}_{об} = \vec{E}_{+} + \vec{E}_{-}$$

Если поле создано не одним, а n зарядами, то напряженность электростатического поля будет равна векторной сумме напряженностей полей созданных каждым зарядом по отдельности – *принцип суперпозиции (наложения) электростатических полей*.

$$\vec{E}_{об} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n \quad (1.8)$$

3.1.3 Графическое изображение электростатического поля. Силовые линии (линии вектора напряженности). Поток вектора напряженности электростатического поля

Графически электростатическое поле можно изобразить с помощью силовых линий или линий вектора напряженности.

Линии напряженности – линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора E (см. рис. 4).

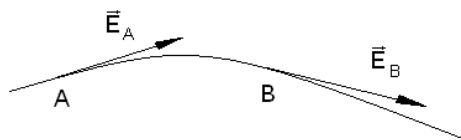


Рис. 4 – Силовые линии электростатического поля

Силовые линии имеют особенности:

1. Силовые линии начинаются и заканчиваются на зарядах.
2. Силовые линии нигде не пересекаются.
3. Если напряженность поля во всех точках одинакова, то силовые линии параллельны друг другу и расположены на одинаковом расстоянии. Такое электростатическое поле называют *однородным*.

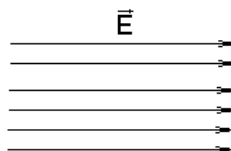


Рис. 5 – Однородное электростатическое поле

Примеры графического изображения электростатических полей.

1. Поле точечного заряда.

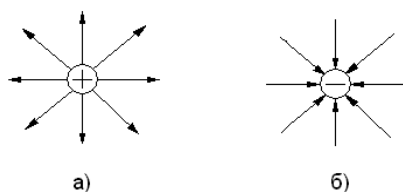


Рис. 6 – а) поле точечного положительного заряда
б) поле точечного отрицательного заряда

2. Поле двух разноименных зарядов.

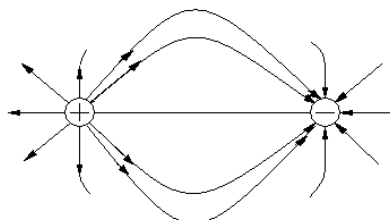


Рис. 7 – Графическое изображение электростатического поля диполя

Число силовых линий, пронизывающих данную площадку, называется потоком вектора напряженности N .

Условились, через единичную площадку проводить число силовых линий равных напряженности E электрического поля. Тогда число силовых линий через любую площадку будет равно

$$N = E \cdot S \cdot \cos \alpha \quad (1.9)$$

здесь α – угол между вектором E и n (n – нормаль к поверхности).

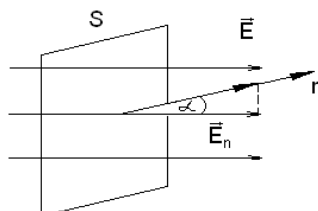


Рис. 8 – Поток вектора напряженности

Величина $E_n = E \cdot \cos \alpha$ – проекция вектора напряженности на нормаль n к поверхности. Формула $N = E \cdot S \cdot \cos \alpha$ справедлива в случае, если поле однородно.

В случае неоднородности поля всю площадь S можно разбить на участки dS . В этом случае:

$$dN = E \cdot dS \cdot \cos \alpha \quad (1.10)$$

Тогда полный поток равен:

$$N = \int_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} \cdot \cos \alpha = \int_S E_n dS$$

$$N = \oint_S E_n dS \quad (1.11)$$

Выражение 1.11 - поток вектора напряженности \mathbf{E} через замкнутую поверхность S .

3.1.4 Работа перемещения заряда в электрическом поле. Потенциал. Второе уравнение Максвелла для электростатики

На всякий заряд, находящийся в электрическом поле, действует сила, которая может перемещать этот заряд. Возьмем положительный заряд и поместим в точку поля (см. рис. 11). Поле действует на заряд. Если он свободный, то начинает перемещаться и совершается работа, силами электрического поля отрицательного заряда.

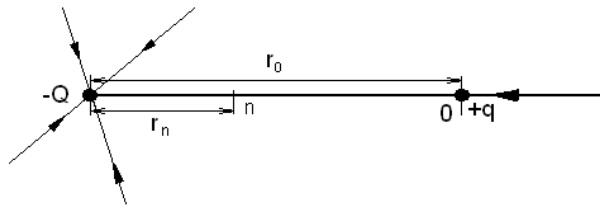


Рис. 11 – Работа перемещения точечного положительного заряда

По закону Кулона, сила, перемещающая заряд, является переменной и равной:

$$F = \frac{Qq}{4\pi\epsilon_0 r^2}, \quad (1.17)$$

где r – переменное расстояние между зарядами.

По определению:

$$A = - \int_{r_0}^{r_n} F \cdot dr = -qQ \int_{r_0}^{r_n} \frac{dr}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad (1.18)$$

$$A = q \left(\frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r_n} - \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r_0} \right) \quad (1.19)$$

Знак минус перед интегралом, поскольку для сближающихся зарядов величина dr отрицательна, тогда как работа должна быть положительной, так как перемещение заряда q происходит в направлении действия силы.

Величина $\left(\frac{-Qq}{4\pi\epsilon_0 r} \right)$ представляет собой потенциальную энергию E_n заряда в данной точке поля:

$$E_n = - \frac{Qq}{4\pi\epsilon_0 r} \quad (1.20)$$

Знак минус означает, что по мере перемещения заряда силами поля, его потенциальная энергия убывает, переходя в работу перемещения.

Величина, равная потенциальной энергии единичного положительного заряда ($q=+1$ Кл) называется *потенциалом электрического поля*, или *электрическим потенциалом*.

$$\varphi = \pm \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r} \quad (1.21)$$

Знак минус относится к случаю отрицательного заряда, а знак плюс – положительного заряда.

Подставим формулу (1.21) в (1.19):

$$A = q(\varphi_0 - \varphi_n) \quad (1.22)$$

Или $A/q = (\varphi_0 - \varphi_n)$, при этом полагая, что $q=+1$, получим:

$$\varphi_0 - \varphi_n = A \quad (1.23)$$

Таким образом, разность потенциалов двух точек поля равна работе сил поля по перемещению единичного положительного заряда из одной точки в другую.

Переместим заряд q (действуя против сил поля) из некоторой точки на бесконечность ($r_n = \infty$). Из формул (1.21) и (1.22) получаем:

$$\varphi_0 = \frac{A}{q} \quad (1.24)$$

При $q=+1$ получим $\varphi_0 = A$ потенциал точки электрического поля равен работе перемещения единичного положительного заряда из данной точки на бесконечность.

$$1 \text{ В} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}}$$

Один вольт является потенциалом такой точки поля, при перемещении из которой заряда $+1$ Кл на бесконечность совершается работа в 1 Дж.

Если поле создается несколькими зарядами, то его потенциал равен алгебраической сумме потенциалов полей всех этих зарядов.

Работа перемещения заряда в электрическом поле не зависит от формы пути, а зависит только от разности потенциалов начальной и конечной точек пути. Электрические силы являются потенциальными силами.

Из формулы (1.19) следует, что работа, совершаемая при перемещении электрического заряда во внешнем электростатическом поле по любому замкнутому пути L равна нулю (т.к. поле потенциально):

$$\oint_L dA = 0 \quad (1.25)$$

Если в качестве заряда, переносимого в электростатическом поле взять единичный положительный заряд, то элементарная работа сил поля на пути dl равна $A = Edl \cos \alpha = E_l dl$, где $E_l = E \cos \alpha$ – проекция вектора напряженности на направление элементарного перемещения. В итоге получим:

$$\oint_L Edl \cos \alpha = \oint_L E_l dl = 0 \quad (1.26)$$

Интеграл (1.26) называется *вторым уравнением Максвелла* для электростатики или циркуляцией вектора напряженности. Из обращения в нуль циркуляции вектора напряженности следует, что линии напряженности электростатического поля не могут быть замкнутыми, поскольку они начинаются и заканчиваются на зарядах.

3.1.7 Электроёмкость. Энергия электростатического поля. Изменение поля при внесении в него диэлектрика

Уединенный проводник – проводник, находящийся вдали от других посторонних тел, которые не могут повлиять на него. Рассмотрим такой проводник в форме шара.

Заряд распределяется по поверхности и шар приобретает потенциал φ . Если сообщать заряд порциями Δq , то потенциал изменится на $\Delta \varphi$, то есть $q = C \cdot \varphi$.

Таким образом:

$$q = C \cdot \varphi, \quad (1.31)$$

где C – коэффициент пропорциональности, называемый *электроёмкостью проводника*.

Электроёмкость проводника зависит от:

1. формы проводника;
2. размера проводника;
3. среды в которой находится данный проводник и не зависит от материала из которого изготовлен проводник.

Электроёмкость уединенного проводника численно равна заряду, изменяющему потенциал проводника на единицу.

$$C = \frac{q}{\varphi} \quad (1.31)$$

Единицей электроёмкости является *фарада* – ёмкость такого уединенного проводника, которому заряд в 1 Кл сообщает потенциал в 1 В.

$$F = \text{Кл} / \text{В}$$

Ёмкостью в 1 Ф обладает уединенный проводящий шар радиусом в $9 \cdot 10^6$ км. Это достаточно большая электроёмкость, поэтому на практике используют $1 \text{ мкФ} = 10^{-6} \text{ Ф}$, $1 \text{ нФ} = 10^{-12} \text{ Ф}$, что соответствует ёмкостям уединенных проводящих шаров радиусами 9 км и 0,9 см.

Проводник, обладающий большой электроёмкостью, должен иметь очень большие размеры. На практике нас интересуют такие системы, в которых поле сосредоточено в некотором объеме, обладающие большой ёмкостью при малых размерах. Такие системы называют *конденсаторы*.

Самый простейший конденсатор – это две заряженные плоскости (с одинаковыми зарядами на пластинах, но противоположными по знаку) разделенных тонким слоем диэлектрика. Такой конденсатор называется *плоским*.

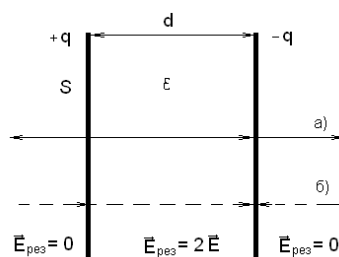


Рис. 16 – Плоский конденсатор

- а) силовые линии поля, созданные положительной пластиной;
 б) силовые линии поля, созданные отрицательной пластиной.

За пределы плоскости электростатическое поле не выходит при очень больших пластинах, однако в реальных случаях это не так. На рисунке 16 показано результирующее поле, созданное пластинами.

Емкость плоского конденсатора:

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}, \quad (1.32)$$

где S – площадь пластин, d – расстояние между пластинами конденсатора.

Постоянный электрический ток.

В электродинамике – разделе учения об электричестве, в котором рассматриваются явления и процессы, обусловленные движением электрических зарядов или макроскопических заряженных тел, - важнейшим понятием является понятие электрического тока:

- а) Всякое упорядоченное (направленное) движение электрических зарядов называется *электрическим током*;
 б) Свободные заряженные микрочастицы называются *носителями тока*;
 в) Вещества, содержащие свободные заряженные микрочастицы называют *проводниками*;
 г) Упорядоченное движение можно создать механическим способом, в этом случае ток называют *конвекционным*.

Направленное движение можно создать электрическим полем, то в этом случае ток называют *током проводимости*.

Условие возникновения и существования электрического тока:

1. Наличие свободных носителей;
2. Источник сторонних сил, преобразующий любой вид энергии в электрическую;
3. Замкнутость цепи.

Количественной мерой электрического тока служит *сила тока* I – скалярная физическая величина, определяемая электрическим зарядом, проходящим через поперечное сечение проводника в единицу времени:

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad (2.1)$$

Если сила тока и его направление не изменяются со временем, то такой ток называется *постоянным*. Для постоянного тока:

$$I = \frac{Q}{t} \quad (2.2)$$

Единица силы тока – ампер (А).

Физическая величина, определяемая силой тока, проходящего через единицу площади поперечного сечения проводника, перпендикулярного направлению тока, называется *плотностью тока* (вектором тока):

$$j = \frac{dI}{dS_{\square}} \quad (2.3)$$

Плотности тока векторная, локальная характеристика.

$$\vec{j} = \frac{dI}{dS} \vec{n}, \quad (2.4)$$

где \vec{j} – единичный вектор нормали к площадке dS , составляющий с вектором j угол α .

Направление вектора j совпадает с направлением упорядоченного движения положительных зарядов. Единица плотности тока – ампер на метр в квадрате (А/м²).

3.2.2 Электродвижущая сила. Сопротивление проводника и его зависимости

Зарядим два проводника 1 и 2 в форме шара разноименным электричеством до потенциалов φ_1 и φ_2 и соединим их третьим проводником.

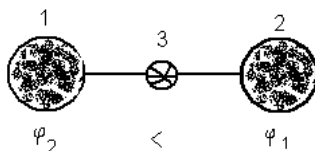


Рис. 18 – Соединение двух проводников разных потенциалов

Свободные носители начнут движение с шара большего потенциала φ_1 к шару с меньшим потенциалом φ_2 . Спустя некоторое время потенциалы выравняются и ток прекратится. Необходимо включить источник сторонних сил 3 для поддержания разности потенциалов. Данные силы действуют только в области 3. Эти силы неэлектростатического происхождения, действующие на заряды со стороны источника тока. В результате по всей цепи действуют одновременно кулоновские силы (к выравниванию потенциалов) и внутри источника тока сторонние силы (к поддержанию разности потенциалов), т.е. кулоновские силы действуют против сторонних сил.

$$F_{\kappa} = q E_{\kappa}$$

$$F_c = q E_c$$

$$A = q \oint_L (E_{\kappa} + E_c) dL$$

Работа электростатического поля по замкнутому контуру равна нулю, т.к. поле потенциально:

$$A = q \oint_L E_{\kappa} dL$$

Следовательно:

$$\frac{A}{q} = \oint_L E_c dL \quad (2.5)$$

Величина, стоящая справа от знака равенства в формуле (2.5) называется электродвижущей силой ЭДС (ε) – характеристика сторонних сил.

ЭДС численно равна работе, совершаемой сторонними силами по перемещению единичного положительного заряда. Единица ЭДС – вольт (В).

При движении электрического заряда он испытывает со стороны проводника. Введем понятие электрического сопротивления.

В 1826 г. немецкий физик Г. Ом опытным путем установил, что $I = \sigma U$, где σ – электропроводность или проводимость проводника.

Величина обратная проводимости $R = \frac{1}{\sigma}$, называется электрическим сопротивлением. Таким образом:

$$I = \frac{U}{R} \quad (2.6)$$

Формула (2.6) выражает закон Ома для участка цепи.

Единица сопротивления – ом (Ом). 1 Ом сопротивление такого проводника, в котором при напряжении 1В течет постоянный ток 1А.

Поскольку сопротивление, оказываемое току металлическим проводником, обусловлено столкновением свободных электронов с ионами металла, следовательно, сопротивление должно зависеть от формы, размеров и вещества проводника.

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (2.7)$$

где l – длина проводника, м; S – площадь поперечного сечения, м²; ρ – коэффициент пропорциональности, характеризующий материал проводника и называемый *удельным электрическим сопротивлением*, Ом·м.

Сопротивление и удельное сопротивление проводников зависят от внешних условий, в частности от температуры:

$$R = R_0 (1 + \alpha t), \quad (2.8)$$

где R_0 – сопротивление проводника при 0°C, t – температура, α – температурный (термический) коэффициент сопротивления. Единица измерения α в СИ – К⁻¹.

Для большинства металлов (при не очень низкой температуре) $\alpha \approx 0,004 \text{ K}^{-1}$.

При очень низких температурах (0,4 – 20 K), сопротивление некоторых металлов (Al, Zn, Pb и др.) и их сплавов скачкообразно падает до нуля, металл становится абсолютным проводником. Это явление называется *сверхпроводимостью* (открыто Камерлинг-Оннесом в 1911 г.)

Рассмотрим *неоднородный* участок цепи, где действующую на участке 1-2 обозначим через ε_{12} , а приложенную на концах участка разность потенциалов через $\varphi_1 - \varphi_2$.

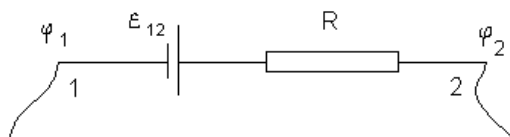


Рис. 19 – Неоднородный участок цепи

$\varphi_1 - \varphi_2$ – разность потенциалов (удельная работа кулоновских сил);

ε_{12} – ЭДС (удельная работа сторонних сил);

IR – U напряжение (полная удельная работа кулоновских и сторонних сил).

$$IR = \varepsilon_{12} + \varphi_1 - \varphi_2 \quad (2.9)$$

Выражение (2.9) представляет собой закон Ома для неоднородного участка цепи в интегральной форме, который является обобщенным законом Ома.

Проведем анализ данной формулы:

1. Если на участке цепи отсутствует источник тока ($\varepsilon_{12}=0$), то получаем закон Ома для однородного участка цепи в интегральной форме:

$$IR = \varphi_1 - \varphi_2 = U \quad \text{или} \quad I = \frac{U}{R} \quad (2.10)$$

2. Разомкнутая цепь ($I=0$) $\varphi_1 - \varphi_2 = \varepsilon$. (2.11)

Следовательно, чтобы найти ЭДС источника тока, нужно измерить разность потенциалов на его клеммах при разомкнутой цепи. Пример: батарейка - 1,5 +, 1,5 В это и есть ЭДС.

3. Если электрическая цепь замкнута, то выбранные точки 1 и 2 совпадают и $\varphi_1 - \varphi_2 = 0$. В этом случае получаем закон Ома для замкнутой электрической цепи:

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

$$I = \frac{\varepsilon}{R_1 + r}, \quad (2.12)$$

где ε – ЭДС, действующая в цепи, R – суммарное сопротивление всей цепи, R_1 – сопротивление внешней цепи, r – внутреннее сопротивление источника тока.

Если $R_1 = 0$ \rightarrow короткое замыкание (КЗ).

$$I_{\max} = \frac{\varepsilon}{r} \quad (2.13)$$

При КЗ падение напряжения внутри источника равно ЭДС. Вся энергия сторонних сил преобразуется в тепловую энергию внутри источника.

Запишем закон Ома для участка цепи $I = \frac{U}{R}$, а поскольку $U = El$ и $R = \rho \frac{l}{S}$, то в результате получаем:

$$I = \frac{ES}{\rho l}$$

$$\frac{I}{S} = \frac{E}{\rho l}$$

Причем:

$$\frac{I}{S} = j, \text{ а } \frac{1}{\rho} = \gamma,$$

где j – плотность тока, γ – удельная проводимость проводника.

Таким образом:

$$\vec{j} = \gamma \vec{E} \quad (2.14)$$

Выражение (2.14) называется *законом Ома в дифференциальной форме*.

Рассмотрим однородный проводник, к концам которого приложено напряжение U . За время dt через сечение проводника переносится заряд $dq=Idt$. Так как ток представляет собой перемещение заряда dq под действием электрического поля, то согласно формуле (1.22), работа тока:

$$dA = U dq = I U dt \quad (2.15)$$

Если сопротивление проводника R , то, используя закон Ома для участка цепи, получим:

$$dA = I^2 R dt = \frac{U^2}{R} dt \quad (2.16)$$

Из (2.15) и (2.16) следует, что мощность тока:

$$P = \frac{dA}{dt} = UI = I^2 R = U^2 / R \quad (2.17)$$

Помимо системных единиц работы на практике широко применяются такие внесистемные единицы работы тока, как *ватт-час*, *гектоватт-час* и *киловатт-час*; 1 Вт·ч соответствует работе тока мощностью в 1 Вт в течение 1 ч.

Если ток проходит по неподвижному металлическому проводнику, то вся работа тока идет на его нагревание и, по закону сохранения энергии $dQ=dA$. Таким образом, используя формулы (2.15) и (2.16), получим:

$$dQ = I U dt = I^2 R dt = U^2 dt / R \quad (2.18)$$

Выражение (2.18) представляет собой закон Джоуля – Ленца, экспериментально установленный независимо друг от друга Дж. Джоулем и Э.Х. Ленцем.

1.4 Лекция № 4 (2 ч)

Тема: Магнитное поле. Электромагнитная индукция.

1.4.1 Вопросы лекции:

1. **Магнитное поле.** Вектор магнитной индукции. Линии магнитной индукции. Закон Ампера. Взаимодействие токов. Сила Ампера. Работа по перемещению проводника в магнитном поле. Формула Лоренца. Движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях.

2. **Электромагнитная индукция.** Явление электромагнитной индукции (опыты Фарадея). Закон Фарадея. Рамка в магнитном поле. Индуктивность контура. Самоиндукция. Взаимная индукция. Трансформаторы. Энергия магнитного поля.

3. **Магнитные свойства вещества.** Магнитные свойства вещества. Диа-, пара-, ферромагнетики. Намагниченность. Магнитное поле в веществе.

4. **Электромагнитные волны.** Экспериментальное получение электромагнитных волн. Свойства электромагнитных волн. Энергия элм. волн.

1.4.2 Краткое содержание вопросов

Магнитные явления были известны ещё в глубокой древности из наблюдений над свойством природного магнитного железняка притягивать железные предметы и намагничивать их. Первое подробное исследование и описание свойств постоянных магнитов было выполнено в 1600 г. Гильбертом.

Уже в XVIII в. было обращено внимание на намагничивание железных предметов и перемагничивание компаса, если вблизи них проходил грозовой разряд. Это наводило на мысль о связи магнитных явлений с электрическими. Справедливость такого предположения было экспериментально подтверждена в 1820 г. датским физиком Эрстедом. Он обнаружил действие электрического тока на магнитную стрелку. Магнитная стрелка устанавливалась перпендикулярно проводнику, проводник с током воздействует на магнитную стрелку (см. рис. 27).

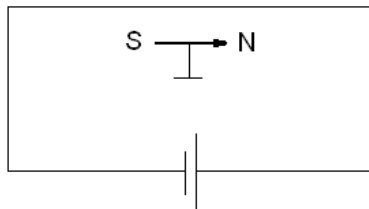


Рис. 27 – Магнитная стрелка вблизи проводника с током

Если проводник скручен в виде витка, то магнитная стрелка устанавливалась вдоль оси катушки полюсами SN (см. рис. 28). Если изменить направление тока, то полюса изменятся на NS.

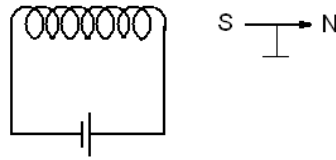


Рис. 28 – Магнитная стрелка вблизи катушки с током

1820 – 1830 гг. Ампер исследовал взаимодействие токов и установил следующие законы:

- 1) Два параллельных проводника с токами одного направления притягиваются (см. рис. 29а);
- 2) Два параллельных проводника с токами противоположного направления отталкиваются (см. рис. 29б);
- 3) Если токи направлены под углом друг к другу, то проводники с токами стремятся установиться так, чтобы проводники были параллельны и направления токов одного направления (см. рис. 29в).

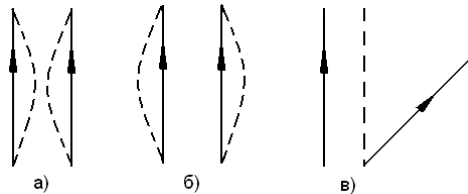


Рис. 29 – Взаимодействие токов

Проводники с током взаимодействуют друг с другом. Это и есть электромагнитное взаимодействие. Получим математическое выражение закона Ампера для силы магнитного взаимодействия токов. С помощью подвижных контуров, помещаемых в специальное приспособление («станок Ампера»), Ампер установил, что величина силы dF взаимодействия двух малых участков проводников (проводов) 1 и 2 с токами пропорциональна длинам dl_1 и dl_2 этих участков, силам тока I_1 и I_2 в них и обратно пропорциональна квадрату расстояния между участками. Дальнейшие экспериментальные исследования и теоретические расчеты Ампера и других ученых показали, что сила взаимодействия пропорциональна синусам углов θ_1 и θ_2 .

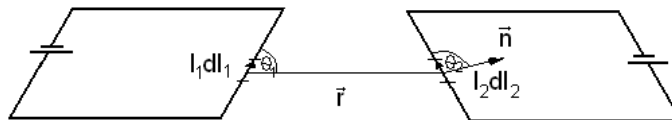


Рис. 30 – «Станок Ампера»

$$d F_{12} = k \frac{I_1 dl_1 I_2 dl_2 \sin \theta_1 \sin \theta_2}{r^2}, \quad (3.1)$$

где $k = \frac{\mu_0}{4\pi}$, а $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная; $I_1 dl_1$ и $I_2 dl_2$ – элементы тока (элемент тока – вектор, равный по величине произведению силы тока I на бесконечно малый участок длины dl и направленный вдоль этого тока). Выражение (3.1) называется *законом Ампера*.

Передача действия одного проводника с током к другому осуществляется через магнитное поле, т.е. вокруг любого проводника с током существует магнитное поле. Движущийся заряд также создает магнитное поле (т.к. ток – это направленное движение заряженных частиц).

Рассмотрим проводник с током и поместим рядом с ним пробный элемент тока Idl (см. рис. 31). На данный элемент тока будет оказываться силовое воздействие, причем $dF \propto Idl$.



Рис. 31 – Проводник с током и пробный элемент тока

$$dF = B Idl \sin \theta, \quad (3.2)$$

где θ – угол между направлением \vec{B} и участком длины $d\vec{l}$; B – характеристика магнитного поля, называемая вектором магнитной индукции (магнитная индукция).

Итак:

1. B – *векторная, силовая, локальная* характеристика магнитного поля;
2. Магнитная индукция численно равна отношению максимальной силы, действующей со стороны магнитного поля на элемент тока к величине этого тока:

$$dB = \frac{dF_{\max}}{Idl} \quad (3.3)$$

3. Единица магнитной индукции в СИ – *тесла* (Тл): 1 Тл – магнитная индукция такого однородного магнитного поля, которое действует с силой 1 Н на каждый метр длины прямолинейного проводника, расположенного перпендикулярно направлению поля, если по этому проводнику проходит ток 1 А.

Поскольку магнитное поле является силовым, то его, по аналогии с электрическим, его изображают с помощью *линий магнитной индукции* – линий, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора B . В отличие от силовых линий электрического поля магнитные линии всегда замкнуты и охватывают проводник с током.

Направление силовых линий магнитного поля тока определяется *по правилу буравчика*: рукоятка буравчика, ввинчиваемого по направлению тока, вращается в направлении магнитных силовых линий.

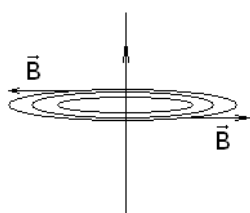


Рис. 32 – Магнитное поле прямого тока

Магнитное поле макротоков описывается вектором напряженности H . Для однородной изотропной среды вектор магнитной индукции связан с вектором напряженности следующим соотношением:

$$B = \mu \mu_0 H, \quad (3.4)$$

где μ_0 – *магнитная постоянная*, μ – *магнитная проницаемость среды*, показывающая, во сколько раз магнитное поле макротоков H усиливается за счет поля микротоков среды.

Пусть проводник с током длиной l , помещен в магнитное поле (см. рис. 34). Выделим в нем элемент тока Idl . На элемент тока действует сила:

$$dF = IBdl \sin \theta, \quad (3.7)$$

$$\text{где } \angle \theta = (\hat{dl}, B)$$

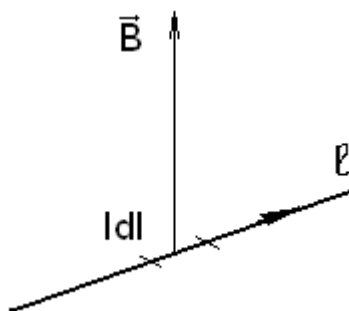


Рис. 34 – Проводник с током в магнитном поле

$$F = \int_l IBdl \sin \theta$$

Если поле однородное $B = \text{const}$ и $I = \text{const}$:

$$F = IB \sin \theta \int_l dl = IlB \sin \theta$$

$$F_A = IlB \sin \theta \quad (3.8)$$

Выражение (3.8) называется *силой Ампера*. В векторной форме:

$$\vec{F}_A = I [\hat{l} \vec{B}] \quad (3.9)$$

Чтобы определить направление силы Ампера применяют правило левой руки.

Правило левой руки:

1. Линии магнитной индукции B входят в левую ладонь;
2. Четыре пальца располагаются по направлению тока;

3. Большой отогнутый палец указывает направление силы F .
Применим данное правило к рисунку 34.

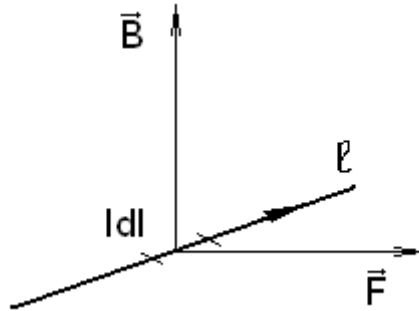


Рис. 35 – Действие силы F на проводник с током

В 1831 году М. Фарадей открыл явление, называемое электромагнитной индукцией.

Опыты:

- Катушка, гальванометр, постоянный магнит.
- Катушка №1, Катушка №2, гальванометр.
- Катушка №1, Катушка №2 с ключом, гальванометр.

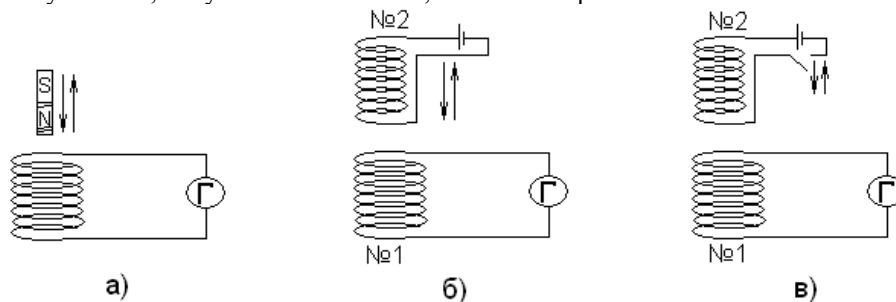


Рис. 42 – Опыты М. Фарадея

Постоянный магнит вставляем в катушку. В момент удаления магнита магнитное поле в катушке ослабляется и в итоге стрелка гальванометра отклоняется. Вдвигаем магнит в катушку => поле усиливается => стрелка гальванометра отклоняется в другую сторону. Таким образом, когда магнитное поле изменяется, то в катушке возникает электрический ток.

Вместо постоянного магнита берем электромагнит (см. рис. 42б). Помещаем катушку №2 в катушку №1. Пока катушки покоятся, то показания гальванометра равны нулю. При движении катушки №2 стрелка гальванометра отклоняется. Если вставить в катушку сердечник, то эффект усиливается. Вывод: если магнитное поле создано постоянным током, то меняющееся магнитное поле порождает электрический ток.

Вставляем катушку №2 в катушку №1 и оставляем её в покое. При замыкании и размыкании ключа в катушке №1 возникает электрический ток.

Ток, возникающий в катушке при изменении магнитного поля называют *индукционным током*.

Результаты опытов М. Фарадей объяснил следующим образом, на примере замкнутого проводника с током, помещенного в магнитное поле.

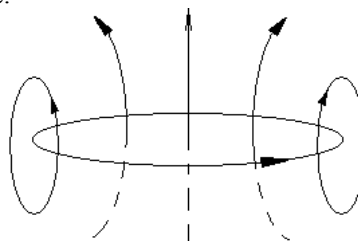


Рис. 43 – Замкнутый проводник в магнитное поле

Выводы:

- Индукционный ток в проводнике возникает, когда проводник пересекают линии индукции магнитного поля;
- Чем выше скорость пересечения линий индукции, т.е. чем больше число линий, пересекающих проводник в единицу времени, тем больше ток.

Максвелл, анализируя опыты Фарадея, несколько обобщил эти опыты:

- Причина появления индукционного тока является изменение магнитного потока, пронизывающего контур (т.е. если меняется число линий, а не только просто пересечение).

$$\varepsilon = \frac{-d\Phi}{dt} \quad (3.15)$$

Выражение (3.15) называется *законом Фарадея – Максвелла*, или *основной закон электромагнитной индукции*.

Величина электродвижущей силы индукции (ЭДС) \mathcal{E} пропорциональна скорости изменения магнитного потока $\frac{d\Phi}{dt}$ через площадь ограниченную контуром. Знак «минус» в формуле позволяет определить направление индукционного тока.

В 1833 г. Ленц установил общее правило для определения направления индукционного тока, получившее название *правило Ленца*:

Индукционный ток всегда направлен так, что своим магнитным полем препятствует тому изменению магнитного поля, которое его вызвало.

Пример:

Выберем положительный обход контура по правилу буравчика по направлению нормали (см. рис. 44).

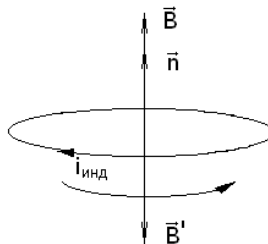


Рис. 44 – Применение правила Ленца

Пусть внешнее магнитное поле усилилось, т.е. $dB/dt > 0$. Соответственно и магнитный поток Φ тоже увеличился, т.е. $d\Phi/dt > 0 \Rightarrow \mathcal{E}$ имеет знак «минус». Таким образом, \mathcal{E} создает индукционный ток $i_{\text{инд}}$, направленный против положительного обхода контура. Индукционный ток $i_{\text{инд}}$ порождает магнитное поле индукцией B' , которое препятствует возрастанию внешнего магнитного поля B .

3.4.2 Самоиндукция. Взаимная индукция. Трансформаторы. Энергия магнитного поля

Самоиндукция и взаимная индукция являются частными случаями электромагнитной индукции.

Пусть по замкнутому контуру протекает переменный ток i_0 , который создает меняющееся во времени магнитное поле (см. рис. 45).

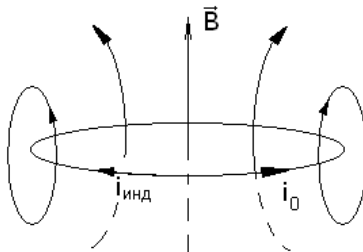


Рис. 45 – Замкнутый контур с переменным током i_0

В итоге, магнитный поток Φ , пронизывающий контур, также будет меняться во времени. Он порождает индукционный ток $i_{\text{инд}}$ в контуре. Направление индукционного тока зависит от того, возрастает или убывает основной ток i_0 .

Сам ток в контуре вызывает индукционный ток – явление *самоиндукции*.

Взаимной индукцией называется возбуждение тока в контуре при изменении тока в другом (соседнем) контуре. Предположим, что в контуре 1 протекает ток I_1 (см. рис. 46). В магнитном поле этого тока находится соседний контур 2.

Магнитные свойства вещества. Электромагнитные волны

Вещества, способные намагничиваться и менять магнитное поле называются *магнетиками*.

Ампер выдвинул гипотезу, что причина намагничивания заключается в том, что во всех веществах существуют мельчайшие электрические токи, замыкающиеся в пределах каждого атома (молекулярные токи).

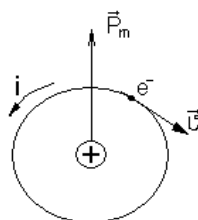
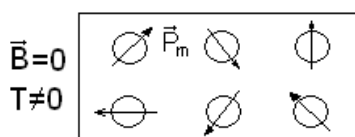


Рис. 48 – Молекулярный ток

Движение электрона в атоме направленное, следовательно, возникает ток. Суммарный ток складывается из токов отдельных атомов. Этот ток замкнутый. Каждый молекулярный ток в атоме обладает определенным магнитным моментом P_m , а значит и магнетик в целом при намагничивании приобретает магнитный момент, равный векторной сумме моментов всех молекулярных токов.

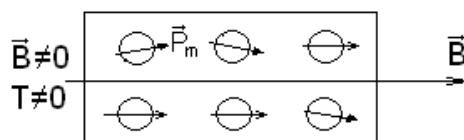
Вещество в магнитном поле

а)



В случае если внешнее магнитное поле отсутствует, то суммарный магнитный момент равен нулю и как итог, вещество не намагничивается.

б)



При помещении вещества во внешнее магнитное поле, оно стремится сориентировать магнитные моменты атомов так, чтобы их направления совпадали с вектором магнитной индукции или угол между ними был наименьший. Суммарный магнитный момент уже не равен нулю и вещество создает дополнительное магнитное поле $\vec{B} > \vec{B}_0$ вещество намагничивается.

Магнитные свойства различных веществ гораздо разнообразнее, чем электрические свойства. В то время, как диэлектрическая проницаемость ϵ у всех веществ всегда меньше единицы, то магнитная проницаемость μ может быть, как и меньше единицы, так и ей равной и больше.

При помещении атома в магнитное поле, возникает наряду с магнитным (орбитальным) моментом P_{orb} , дополнительный индуцированный момент P_{ind} , направленный против основного поля (ослабляет поля).

Если просуммировать все орбитальные моменты, то может оказаться, что $\sum_0^n P_{orb} = 0$ или $\sum_0^n P_{orb} \neq 0$.

Вещества, у которых суммарный орбитальный момент равен нулю называются *диамагнетиками*. К ним относятся газы, органические вещества, Zn, Au, Cu и т.д. Диамагнетизм присутствует всегда, но он слабо выражен. Если других эффектов нет, то он заметен. Диамагнетики ослабляют внешнее магнитное поле и выталкиваются из него. Механизм – *индукционный*, т.е. в веществе индуцируется магнитный момент при помещении его в магнитное поле.

Парамагнетики – это очень слабые магнетики, но сильнее чем диамагнетики (на 1-2 порядка). Они усиливают внешнее магнитное поле в которое его вносят. К парамагнетикам относятся редкоземельные элементы, Pt, Al и т.д. Механизм – ориентационный, т.е. у вещества заранее имеются ненулевые магнитные моменты ($\sum_0^n P_{orb} \neq 0$, $\sum_0^n P_{orb} > \vec{B}$, $\sum_0^n P_{ind} < \vec{B}$). Эти магнитные моменты хаотично направлены из-за тепловой разориентации. Внешнее магнитное поле стремится их выстроить.

Ферромагнетики (от лат. ferrum - железо) – это очень сильный магнетик, в сотню и тысячу раз больше предыдущих. Ферромагнетизм бывает только у ограниченного круга твердых веществ (Fe, Co, Ni). Ферромагнетики очень сильно намагничиваются, однако сильные магнитные поля с их помощью получить невозможно. В случае сильных полей наступает магнитное насыщение и магнитная проницаемость среды μ , сильно уменьшается.

При некоторой *критической температуре* $T_{кр}$ (*точка Кюри*), ферромагнетик превращается в парамагнетик. Например, у железа $T_{кр}=1043$ К, у никеля $T_{кр}=630$ К.

Электромагнитная волна – процесс распространения электромагнитного поля в пространстве. Она представляет собой совокупность электрических и магнитных полей. Впервые на опыте электромагнитная волна была получена немецким физиком Г. Герцем.

Свойства электромагнитных волн

1. Напряженность магнитного поля H колеблется перпендикулярно напряженности электрического поля E и скорости ϑ ;

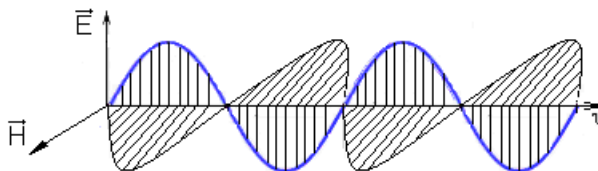


Рис. 49 – Электромагнитная волна

2. Векторы \vec{E} и \vec{H} изменяются синхронно, т.е. напряженность электрического поля возрастает \rightarrow напряженность магнитного поля также увеличивается;
3. Электромагнитная волна поперечная;
4. Если частота колебаний постоянная, то электромагнитная волна монохроматическая;
5. Скорость распространения в среде:

$$\vartheta = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} \sqrt{\varepsilon \mu}} \quad (3.26)$$

В вакууме:

$$\vartheta = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \quad (3.27)$$

6. Для электромагнитных волн выполняется закон отражения и преломления. Электромагнитная волна, распространяясь в пространстве, переносит энергию *без переноса вещества*. Количество энергии, переносимое волной за единицу времени через единицу площади:

$$\vec{P} = [\vec{E} \vec{H}] \quad (3.28)$$

Выражение (3.28) называется *вектором Умова – Пойтинга*.

1.5 Лекция № 5 (2 часа)

Тема: Волновая оптика

1.5.1 Вопросы лекции:

1. **Элементы геометрической оптики.** Природа света. Основные законы оптики. Принципы Гюйгенса и Ферма. Законы отражения и преломления света. Полное отражение. Рефрактометры и их применение в сельском хозяйстве. Линзы. Построение изображений с помощью линз.
2. **Интерференция.** Оптические приборы. Интерференция, когерентные источники. Методы наблюдения интерференции. Применение интерференции света. Дифракция на щели и решетке. Анализ света дифракционной решеткой.
3. **Дисперсия и поляризация света.** Рентгеновская дифракция. Рентгеноструктурный анализ и его особенности применительно к биологическим системам. Дисперсия света. Спектры. Спектральный анализ. Спектроскопия. Естественный и поляризованный свет. Анализ поляризованного света.

1.5.2 Краткое содержание вопросов

Оптика – раздел физики, в котором изучается вопрос о природе света, закономерностях световых явлений и процессы взаимодействия света с веществом (от греческого *οπτική* (оптикос) – зрительный).

В течение последних трех с половиной столетий представления о природе света претерпело весьма существенное изменение.

Основные законы оптики известны ещё с древних времён. Так, Платон (430 г. до н.э.) установил закон прямолинейного распространения и закон отражения света. Аристотель (350 г. до н.э.) и Птоломей изучали преломление света. Первые представления о природе света возникли у древних греков и египтян, которые в дальнейшем, по мере изобретения и усовершенствования различных оптических инструментов, например, параболических зеркал (XVII), фотоаппарата и микроскопа (XVI), зрительной трубы (XVII), развивались и трансформировались. В конце XVII в. на основе многовекового опыта и развития представлений о свете возникли две теории света: корпускулярная (И. Ньютон) и волновая (Р. Гук и Х. Гюйгенс).

Согласно корпускулярной теории (теории течения) свет представляет собой поток частиц (корпускул), испускаемых светящимися телами и летящих по прямолинейным траекториям. Движение световых корпускул Ньютон подчинил сформулированным им законам механики. Так, отражение света понималось аналогично отражению упругого шарика при ударе о плоскость, где также соблюдается закон

равенства углов падения и отражения. Преломление света Ньютон объяснил притяжением корпускул преломляющей средой, в результате чего скорость корпускул меняется при переходе из одной среды в другую.

Из теории Ньютона следовало постоянство синуса угла падения α к синусу угла преломления β :

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c}{v} = n$$

где c – скорость света в вакууме, v – скорость света в среде. Поскольку n в среде всегда больше единицы, то по теории Ньютона $v < c$, т.е. скорость света в среде всегда должно быть больше скорости его распространения в вакууме. Однако согласно теории Гюйгенса $v > c$.

Таким образом, к началу XVIII в. существовало два противоположных подхода к объяснению природы света: корпускулярная (И. Ньютон) и волновая (Х. Гюйгенс). XVIII в стал веком борьбы этих теорий. К началу XIX в. корпускулярная теория была полностью отвергнута и восторжествовала волновая теория. Представление о волновой (электромагнитной) природе света оставалось незыблемым вплоть до конца XIX в. Однако, к этому времени накопился достаточно обширный материал (изучение данных о спектрах свечения химических элементов, о распределении энергии в спектре теплового излучения чёрного тела и т.д.) не согласующийся и даже противоречащий данной теории. Всё это привело к необходимости предположить, что излучение, распространение и поглощение электромагнитной энергии носит дискретный (прерывистый) характер.

Исходя из этого предположения немецкий физик Планк в 1900 г. создал квантовую теорию электромагнитных процессов, т.е. свет испускается, распространяется и поглощается не непрерывно (как это следовало из волновой теории), а порциями (квантами), энергия которых определяется частотой ν :

$$E = h\nu$$

где $h = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ называется *постоянной Планка*.

Эйнштейн в 1905 г. разработал квантовую теорию света, согласно которой свет представляет собой поток световых частиц – фотонов. Таким образом в начале 20 в. возникла новая теория о природе света – квантовая теория, возрождающая в известном смысле корпускулярную теорию Ньютона.

Важную роль в дальнейшем развитии квантовой теории света сыграли теоретические исследования атомных и молекулярных спектров, выполненные Бором (1913), Шредингером (1925), Дираком (1930) и т.д.

На сегодняшний день *свет* – сложный электромагнитный процесс, обладающий как волновыми, так и корпускулярными свойствами.

Свойства света

Волновые	Квантовые
-отражение	-фотоэффект
-преломление	-давление света
-интерференция	-атомные спектры
-поляризация	-люминесценция
-дисперсия	
-дифракция	

В некоторых явлениях (интерференция, дифракция, поляризация света и т.д.) обнаруживаются волновые свойства света; а в таких явлениях, как люминесценция, фотоэффект и т.д. обнаруживаются корпускулярные свойства света. Т.о. волновая и квантовая теории не отвергают, а дополняют друг друга, отражая тем самым двойственный характер свойств света.

Свет – единство дискретности и непрерывности.

В настоящее время установлено, что корпускулярно - волновая двойственность свойств присуща также любой элементарной частице вещества. Например, обнаружена дифракция электронов, нейтронов. Корпускулярно – волновой дуализм является проявлением двух форм существования материи – вещества и поля.

Среда, во всех точках которой скорость распространения света одинакова, называется *оптически однородной средой*. Рассмотрим, исходя из волновой теории явления отражения и преломления монохроматического света на плоской границе раздела двух различных, оптически однородных сред.

Законы отражения и преломления света являются следствием *принципа Ферма*: Из всех возможных траекторий, соединяющих источник и приемник света, реализуется то, для которых время распространения будет минимальным.

Возьмем границу двух прозрачных сред с показателями преломления n_1 и n_2 (см. рис. 50), где $n = c / v$ называется *абсолютным показателем преломления*. Абсолютный показатель преломления показывает во сколько раз скорость света в среде v меньше чем в вакууме c .

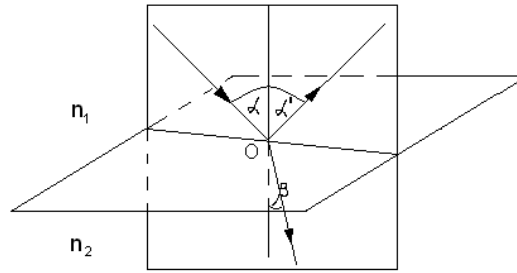


Рис. 50 – Граница раздела двух сред

Закон отражения:

1. Падающий, отраженный лучи и перпендикуляр, опущенный в точку падения луча, лежат в одной плоскости;
2. Угол падения α равен углу отражения α' .

Закон преломления:

1. Падающий, преломленный лучи и перпендикуляр, опущенный в точку падения луча, лежат в одной плоскости;
2. Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления равно отношению скорости света в первой среде к скорости света во второй среде:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}, \quad (4.1)$$

где n_{21} – относительный показатель преломления.

4.1.3 Линзы. Построение изображений с помощью линз

Раздел оптики, в котором законы распространения света рассматриваются на основе представлений о световых лучах, называется *геометрической оптикой*.

Световой луч – узкий канал, в котором распространяется энергия света.

Геометрическая оптика позволяет разрабатывать основные явления, связанные с прохождением света через оптические системы и является поэтому основой теории оптических приборов. Для изменения направления световых лучей в оптических приборах широко используют линзы (от лат. lens - чечевица).

Линзой называется прозрачное (чаще всего стеклянное) тело, ограниченное двумя криволинейными (обычно сферическими) поверхностями или одной криволинейной и одной плоской поверхностью.

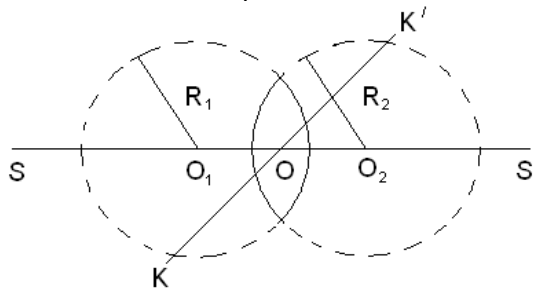


Рис. 52 – Линза

O_1, O_2 – центры кривизны линзы; R_1, R_2 – радиусы кривизны; точка O – оптический центр линзы; прямая SS' – *главная оптическая ось*.

Любая прямая, проходящая через оптический центр линзы под углом к главной оптической оси, называется *побочной оптической осью* (в нашем случае KK').

Линза называется *тонкой*, если толщина её в центре \ll радиуса кривизны R .

Свойства линз

1. Луч, идущий вдоль любой оптической оси, а также через оптический центр линзы, не преломляется;
2. Лучи, идущие параллельно главной оптической оси, после преломления могут:
 - а) сходиться в одной точке, которая называется *фокусом* (причем у линзы может быть двойной, тройной и т.д. фокусы);
 - б) расходиться, но их продолжение собирается в точке, называемой *мнимый фокус*.

По оптическим свойствам линзы делятся на собирающие (обозначаются \uparrow) и рассеивающие (обозначаются \downarrow).

Рассмотрим пример построения изображения с помощью собирающей и рассеивающей линзы.

Пример 1. Предмет KK' находится за фокусом собирающей линзы. В результате построения получаем изображение предмета KK' (см. рис. 53а):

- а) действительное;
- б) увеличенное;
- в) обратное.

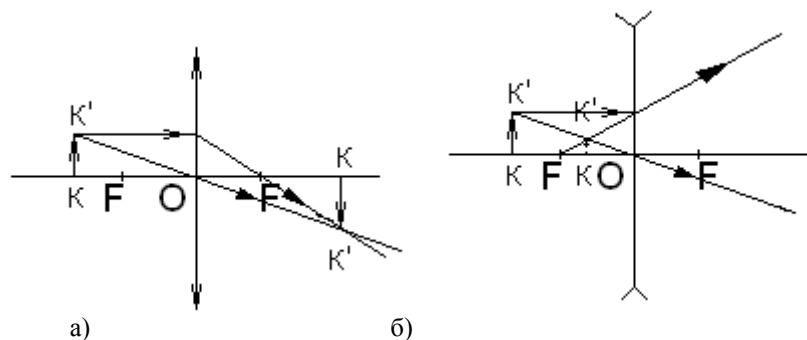


Рис. 53 – Построение изображения с помощью
а) собирающей линзы
б) рассеивающей линзы

Пример 2. Предмет KK' находится за фокусом рассеивающей линзы. В результате построения получаем изображение предмета KK' (см. рис. 53б):

- а) мнимое;
- б) уменьшенное;
- в) прямое.

Расстояние от оптического центра линзы до фокуса, называется *фокусным расстоянием* f . Величина обратная фокусному расстоянию, называется *оптической силой линзы* D :

$$D = 1/f \quad (4.3)$$

Единица измерения оптической силы линзы – диоптрия (дптр).

Формула тонкой линзы:

$$\pm \frac{1}{a} \pm \frac{1}{b} = \pm \frac{1}{f}, \quad (4.4)$$

где a – расстояние до предмета, b – расстояние до изображения, «+» – действительный предмет или изображение, «-» – мнимый предмет или изображение, «+» – оптическая сила линзы положительна, а «-» – отрицательна.

Интерференционные явления. Пространственная и временная когерентность. Интерферометр

Интерференцией называется результат наложения двух когерентных волн, в результате которого образуется периодическая картина максимума и минимума интенсивности в виде темных и светлых полос, колец, пятен.

Для того чтобы наблюдалась интерференционная картина, необходимо, чтобы волны испускаемые источником были *когерентными*.

Две волны называются *когерентными*, если в точке наложения разность фаз этих волн остается постоянной.

Впервые идею когерентности реализовал Томас Юнг. В непрозрачной ширме булавкой проделывал два отверстия.

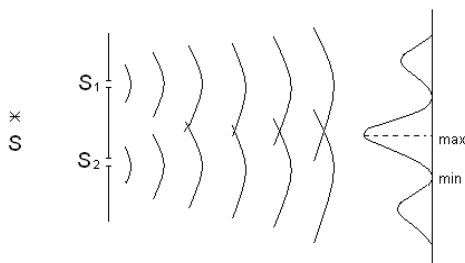


Рис. 54 – Опыт Т. Юнга

Отверстия S_1 и S_2 будут испускать вторичные волны, и они будут когерентны, поскольку образованы от одного и того же *цуга* (цуг – волна, ограниченная в пространстве и во времени). Длина цуга, определяемая интервалом частот, присутствующих в спектре источника света:

$$L = \frac{c}{\Delta \nu} \quad (4.5)$$

От обычных источников света (2 лампочки), интерференционная картина не наблюдается, т.к. источники света не когерентны.

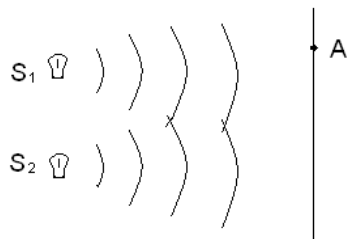


Рис. 55 – Наложение волн от двух лампочек

В точке A интенсивность света от S_1 , $I_1 \propto E^2$, а от S_2 , $I_2 \propto E^2$. Результирующая интенсивность света:

$$I_{рез} = I_1 + I_2 \quad (4.6)$$

Интерференция отсутствует, поскольку интенсивность всюду одинакова. А должно происходить либо усиление света ($\max I_{рез} = I_1 + I_2$), либо гашение ($\min I_{рез} = I_1 + I_2$).

Пусть имеются два когерентных источника света. Выберем некоторую точку на экране. Источники испускают монохроматический свет одной и той же частоты. Результирующая интенсивность в точке A :

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Delta \varphi \quad (4.7)$$

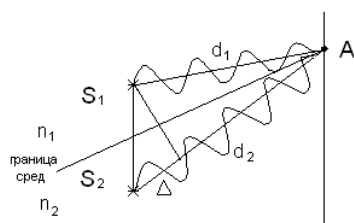


Рис. 56 – Наложение волн от когерентных источников

Узнаем, что же будет с интенсивностью света в точке A . На практике условие \max и \min интенсивности света выражают через оптическую разность хода:

$$\Delta_{opt} = n_2 d_2 - n_1 d_1 \quad (4.8)$$

Если в воздухе или вакууме $n_2 = n_1 = 1$, то $\Delta = d_2 - d_1$ – геометрическая разность хода.

Условие максимума интенсивности света:

$$\Delta = n\lambda, \quad (4.9)$$

где $n = 1, 2, 3, \dots$ – целое число.

Если на разности хода укладывается целое число длин волн, то в точке наложения волн будет максимум интенсивности света.

Условие минимума интенсивности света:

$$\Delta = (2n+1)\lambda/2, \quad (4.10)$$

где $n = 1, 2, 3, \dots$ – целое число.

Если на разности хода укладывается нечетное число длин полуволн, то в точке наложения волн будет минимум интенсивности света.

4.1.5 Дифракция света. Принцип Гюйгенса – Френеля. Дифракционная решетка. Разрешающая способность оптических приборов

Дифракцией света называется огибание световыми волнами препятствий, встречающихся на их пути. Явление дифракции характерно для волновых процессов. Поэтому, если свет является волновым процессом, то для него должна наблюдаться дифракция, т.е. световая волна, падающая на границу какого-либо непрозрачного тела, должна огибать её.

Попытку объяснить дифракцию в своё время предпринял Х. Гюйгенс на основе своего знаменитого принципа: Каждая точка, до которой доходит волновое движение, служит центром вторичных сферических волн, огибающая этих волн дает положение фронта в следующий момент времени.

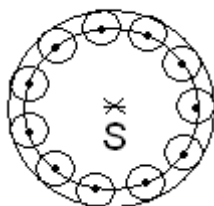


Рис. 58 – Принцип Гюйгенса

Пусть на плоскую преграду с отверстием нормально падает фронт волны (см. рис. 59). По принципу Гюйгенса, каждая точка выделяемого отверстием участка волнового фронта служит центром вторичных волн, которые в однородной и изотропной среде будут сферическими. Построив огибающую вторичных волн, мы убеждаемся в том, что за отверстием волна проникает в область геометрической тени, огибая края преграды.

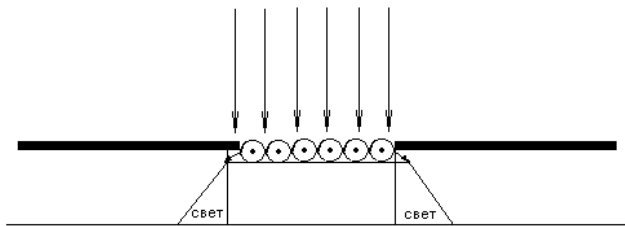


Рис. 59 – Огибание световой волной препятствия

Френель усовершенствовал принцип Гюйгенса, добавив к нему утверждение о *когерентности* вторичных волн. Они действительно когерентны, поскольку зарождаются на волновой поверхности, имеют одинаковые начальные фазы, разность которых от времени зависеть не будет.

Совокупность большого числа узких параллельных щелей, расположенных близко друг от друга, называется *дифракционной решеткой*, а расстояние между соседними щелями – периодом решетки d .

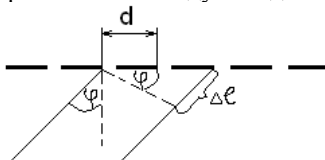


Рис. 60 – Дифракционная решетка

Дифракционная решетка изготавливается путем нанесения тонких штрихов (царапин) на поверхности стеклянной пластинки (прозрачная решетка) или зеркала (отражательная решетка).

Дифракционная решетка работает, как спектральный прибор, заменяя призму, но отличается равной растянутостью линий спектра. Поэтому посредством дифракционной решетки проводятся очень точные измерения длины волны света.

Рассмотрим ход лучей в дифракционной решетке (см. рис. 60). Разность хода лучей:

$$\Delta l = d \sin \varphi \quad (4.12)$$

Если разность хода Δl равна целому числу волн, т.е. при условии:

$$d \sin \varphi = n \lambda \quad (4.13)$$

В результате на экране получим максимум интенсивности света. При разности хода Δl равному нечетному числу полуволн, т.е. при условии:

$$d \sin \varphi = (2n + 1) \lambda / 2 \quad (4.14)$$

В итоге на экране получится минимум интенсивности света.

Согласно формуле (4.13), местоположение каждого максимума зависит от длины волны света. Чем больше длина волны света, тем больше $\sin \varphi$, т.е. тем под большим углом дифракции φ получится максимум для этой волны. Таким образом, при использовании белого света, каждый максимум (кроме центрального) приобретет радужную окраску, т.е. происходит разложение белого света в спектр (фиолетовый ближе к центральному максимуму, поскольку длина волны короче красного).

1.6 Лекция №6 (2 часа).

Тема: Квантовая природа излучения

1.6.1 Вопросы лекции:

1. **Свет и вещество.** Квантовая природа света. Поглощение света веществом. Закон Бугера - Бера. Основы колориметрии. Понятие о вторичных волнах, резонансный характер взаимодействия света и вещества. Экономичность использования оптических методов в исследованиях биологических систем.

2. **Люминесценция.** Законы фотолюминесценции и некоторые её практические применения. Фотоэффект. Законы внешнего фотоэффекта. Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта. Фотоэлементы. Фотоумножители.

3. Масса и импульс фотона. Световое давление. Эффект Комптона и его элементарная теория. Единство корпускулярных и волновых свойств электромагнитного излучения..

1.6.2 Краткое содержание вопросов

При прохождении света через вещество часть фотонов захватывается атомами вещества и световой поток ослабляется. Захват фотона может происходить также вследствие фотоэффекта (о нем мы поговорим позже) или вследствие возбуждения атома на более высокие энергетические уровни. Чем больше атомов и молекул встретится на пути светового потока, тем больше вероятность захвата фотона и тем больше поглощение света.

Вещества, слабо поглощающие свет, принято называть *прозрачными*; вещества, обладающие сильным поглощением – *непрозрачными*. Однако такое подразделение носит относительный характер, поскольку прозрачность зависит не только от природы вещества, но и от толщины его слоя.

Например: алюминий принято считать непрозрачным веществом, а воду прозрачным. Однако очень тонкий слой алюминия пропускает свет, тогда как толстый слой воды практически непрозрачен (на больших глубинах океана темнота).

Для количественной оценки процесса поглощения света введем понятие *интенсивности света* I (плотность потока световой энергии) – это количество энергии, переносимое светом за 1 с через площадь в 1 м², перпендикулярную световому лучу.

Направим на плоскую поверхность цилиндра параллельный пучок света вдоль оси цилиндра ОХ. Где I_0 – интенсивность падающего света (черными точками обозначены атомы, в которых фотоны были захвачены электронами).

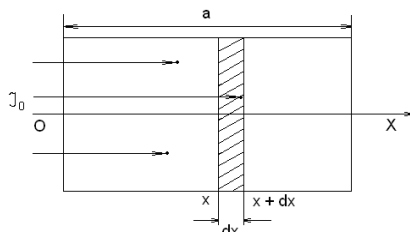


Рис. 68 – Прохождение света через вещество

На расстоянии x от поверхности мысленно выделим бесконечно тонкий слой вещества dx . Изменение интенсивности света dI_x , происходящее в этом слое в связи с поглощением, будет пропорционально толщине слоя dx и интенсивности падающего света:

$$dI_x = -k I_x dx \quad (4.17)$$

где k – *коэффициент поглощения*, характеризующий поглощательную способность данного вещества и не зависящий от толщины слоя. Знак минус указывает на ослабление света в слое

$$\frac{dI_x}{I_x} = -k dx$$

Проинтегрируем обе части уравнения (левую часть от I до I_0 , правую по всей толщине a):

$$\int_{I_x}^I \frac{dI_x}{I_x} = -k \int_0^a dx$$

$$\frac{\ln I}{I_0} = -ka$$

$$I = I_0 e^{-ka}, \quad (4.18)$$

где I – интенсивность света, падающего на пластину, I_0 – интенсивность света, прошедшего через пластину

Данное соотношение (4.18), называют *законом Бугера*. Данный закон открыт в 1729 г. французским физиком Пьером Бугером. Он справедлив не только для интенсивности света I , но и для силы света и светового потока.

Из формулы (4.18) следует, что при:

$$a = \frac{1}{k} \quad \text{будет} \quad \frac{I}{I_0} = e \approx 2,72$$

т.е. коэффициент поглощения вещества есть величина, обратная толщине такого слоя данного вещества, при прохождении которого интенсивность света ослабляется *в e раз* ($e \approx 2,72$ в 3 раза).

Для различных веществ значения коэффициента поглощения разные.

Например: для воздуха $k = 10^{-3} \text{ м}^{-1}$, для стекла $k = 1 \text{ м}^{-1}$, для металлов $k \sim 10^6 \text{ м}^{-1}$

Это означает, что, к примеру, для трехкратного ослабления интенсивности света достаточен слой металла толщиной:

$$a = \frac{1}{10^6} \text{ м} = 1 \text{ мкм}$$

Или стекла:

$$a = \frac{1}{1} \text{ м} = 1 \text{ м}$$

Коэффициент поглощения зависит от длины волны λ . График этой зависимости представляет собой кривую с максимумами в определенных интервалах длин волн, в которых происходит сильное поглощение света данным веществом. Эти интервалы называют полосами поглощения. У прозрачных тел (вода, стекло) полосы поглощения находятся в инфракрасной или ультрафиолетовой части спектра. У окрашенных тел полосы поглощения лежат (хотя бы частично) в видимой части спектра.

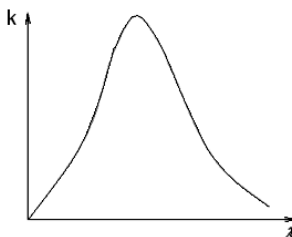


Рис. 69 – Зависимость коэффициента поглощения от длины волны

Вообще говоря, всякое вещество обладает в большей или меньшей мере *селективным* (избирательным) поглощением, т.е. значение коэффициента поглощения зависит от длины волны света.

Например: 1) вода и водяной пар сильно поглощают инфракрасное излучение. 2) обыкновенное стекло хорошо пропускает видимый свет, но значительно ослабляет инфракрасное излучение (с длиной волны $\lambda > 2 \text{ мкм}$) и почти полностью поглощает ультрафиолетовое излучение ($\lambda < 0,38 \text{ мкм}$).

4.2.2 Люминесценция. Закон фотолюминесценции и некоторые ее практические применения

Излучение фотона происходит при переходе атомного электрона с более высокого на низшие энергетические уровни. Этого можно достичь путем нагревания тела до высокой температуры. Однако сообщить энергию электронам в атомах, можно и другими способами, например облучением светом рентгеновскими лучами, элементарными частицами.

В природе давно известно излучение, отличное по своему характеру от всех известных видов излучения (теплового излучения, отражения, рассеяния света). Этим излучением является люминесцентное излучение.

Люминесценция (от лат. *lumen*, род. падеж *luminis* – свет и *escent* – суффикс, означающий слабое действие). *Люминесценция* – это свечение вещества, являющееся избытком под тепловым излучением этого вещества, при данной температуре и имеющее конечную длительность.

Как мы уже говорили, люминесценции должно предшествовать возбуждение атомов и молекул вещества. После устранения возбудителя люминесценция продолжается в течение некоторого промежутка времени, зависящего от природы люминесцирующего вещества и изменяющегося в широких пределах: от миллиардных долей секунды до многих часов и даже суток.

По длительности свечения люминесценцию подразделяют на:

1. *флуоресценцию* (кратковременное «послесвечение»);
2. *фосфоресценцию* (длительное «послесвечение»).

Вещества, обладающие ярко выраженной способностью люминесцировать, называются *люминофорами*.

В зависимости от способов возбуждения люминесценции различают несколько ее видов:

1. *Фотолюминесценция* – возбуждается видимым и ультрафиолетовым излучением. *Пример:* свечение часового циферблата и стрелок, окрашенных соответствующим люминофором.

2. *Рентгенолюминесценция и радиолюминесценция* – возбуждаются рентгеновскими лучами и радиоактивным излучением. *Пример:* ее можно наблюдать (рентгенолюминесценцию) на экране рентгеновского аппарата. Радиолюминесценцию на экране сцинтилляционных счетчиков.

3. *Катодолюминесценция* – возбуждается электронным лучом. *Пример:* на экране осциллографа, телевизора и т.д.

4. *Электролюминесценция* – возбуждается электрическим полем. *Пример:* в газоразрядных трубках.

Хемилюминесценция – возбуждается химическими процессами в веществе. *Пример:* свечение белого фосфора, насекомых, морских животных

Гипотеза Планка, получила подтверждение и дальнейшее развитие при объяснении фотоэффекта – явления, открытие и исследование которого сыграло важную роль в становлении квантовой теории.

Фотоэффектом называется освобождение (полное или частичное) электронов от связей с атомами и молекулами вещества под воздействием света (видимого, инфракрасного и ультрафиолетового).

Различают:

1. Внешний фотоэффект;
2. Внутренний фотоэффект;
3. Вентильный фотоэффект.

Если электроны выходят за пределы освещаемого вещества (полное освобождение), то фотоэффект называется *внешним* (открыт в 1887 г. Герцем и подробно исследован в 1888 г А.Г. Столетовым). Внешний фотоэффект наблюдается в твердых телах (металлах, полупроводниках, диэлектриках), а также в газах на отдельных атомах и молекулах.

Если электроны теряют связь только со «своими» атомами и молекулами, но остаются внутри освещаемого вещества в качестве «свободных электронов» (частичное освобождение), увеличивая тем самым электропроводность вещества, то фотоэффект называется *внутренним*. Открыт в 1873 г американским физиком У. Смитом.

Вентильный фотоэффект, являющийся разновидностью внутреннего фотоэффекта, – возникновение Э.Д.С. (фото – Э.Д.С.) при освещении контакта двух разных полупроводников или полупроводника и металла.

Экспериментальные исследования, выполненные Столетовым, а также другими учёными, привели к установлению следующих *законов внешнего фотоэффекта*:

1. Фототок насыщения I (т.е. максимальное число электронов, освобождаемых светом в 1 с) прямо пропорционально световому потоку Φ :

$$I = k\Phi, \quad (4.25)$$

где k – фоточувствительность освещаемой поверхности. Измеряется в СИ мкА/лм .

2. Скорость фотоэлектронов возрастает с увеличением частоты падающего света и не зависит от его интенсивности.

3. Независимо от интенсивности света фотоэффект начинается только при определённой (для данного металла) минимальной частоте света, называемой «*красной границей*» фотоэффекта.

Законы фотоэффекта нельзя объяснить на основе волновой теории света, а они получают простое истолкование на основе квантовой теории света.

Согласно этой теории величина светового потока определяется числом световых квантов (фотонов). Каждый фотон может взаимодействовать только с одним электроном. Поэтому максимальное число фотоэлектронов должно быть пропорционально световому потоку (первый закон фотоэффекта).

Энергия фотона $h\nu$, поглощенная электроном, расходуется на совершение электроном работы выхода A из металла, а оставшаяся часть этой энергии представляет собой кинетическую энергию фотоэлектрона $m\vartheta^2/2$. Тогда согласно закону сохранения энергии:

$$h\nu = i \frac{m\vartheta_{\max}^2}{2} + A_{\text{вых}} \quad (4.26)$$

Эта формула, предложенная в 1905 г. Эйнштейном и подтверждённая затем многочисленными экспериментами, называется *уравнением Эйнштейна*. Данное уравнение позволяет объяснить второй и третий законы фотоэффекта.

1.7 Лекция №7 (2 часа)

Тема: Элементы физики атома и атомного ядра

1.7.1 Вопросы лекции:

1. **Строение атома.** Развитие представлений о строении атома. «Планетарная» модель Резерфорда. Постулаты Бора. Уровни энергий в атоме водорода.

2. **Строение ядра атома.** Ядерные силы. Дефект массы и энергии связи ядра. Естественная и искусственная радиоактивность. Закон радиоактивного распада. Ядерные реакции. Ядерная энергетика. Ядерное горючее. «Мечение» атома в биологии. Неисчерпаемость и бесконечность материи.

1.7.2 Краткое содержание вопросов

Подозрение о том, что все тела состоят из атомов возникло ещё 2000 лет назад в Греции (от греч. атомос – неделимый).

В начале XIX в. стало ясно, что без атомных представлений вещества не обойтись. Как устроен атом? На тот момент не было экспериментальных данных. С открытием рентгеновских лучей, катодных лучей (пучок электронов), исследовали влияние электрических и магнитных полей на оптические явления. Когда были открыты закономерности в оптических спектрах, возникла необходимость рассуждать на тему, как устроен атом. К началу XX в. было с полной достоверностью установлено:

1. Атом в целом электронейтрален;
2. В состав атома входят отрицательно заряженные электроны.

В 1904 г. Д. Томсон высказал гипотезу о том, как устроен атом. Открыв в 1897 году электрон, Томсон предположил, что «корпускулы» (так Томсон называл электроны, хотя ещё в 1894 году Дж. Дж.

Стоуни предложил называть «атомы электричества» электронами) являются составными частями атома и решил создать модель атома, отражающую это предположение. С точки зрения Томсона:

...атомы элементов состоят из нескольких отрицательно заряженных корpusкул, заключённых в сферу, имеющую однородно распределённый положительный электрический заряд...

Атом по Томсону состоит из электронов, помещённых в положительно заряженный «суп», компенсирующий отрицательные заряды электронов, подобно отрицательно заряженным «изюминкам» в положительно заряженном «пудинге». Электроны, как предполагалось, были распределены по всему атому.

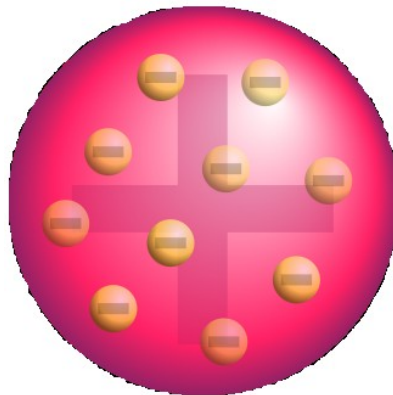


Рис. 90 – «Пудинговая модель атома» по Томсону

Испускание света атомом Томсон объяснял колебаниями электронов. Однако модель атома, предложенная Томсоном, оказалась недостоверной, поскольку такой атом должен давать *сплошной* спектр. Как показывала практика, атом дает *линейчатый* спектр.

Важный вклад в создание теории строения атома внёс английский физик Эрнест Резерфорд (1871 – 1937), который проводил опыты по изучению прохождения *альфа-частиц* через тонкие металлические пластины золота и платины. Таким образом, предлагалось изучить рассеяние (изменение направления движения) альфа-частиц в веществе.

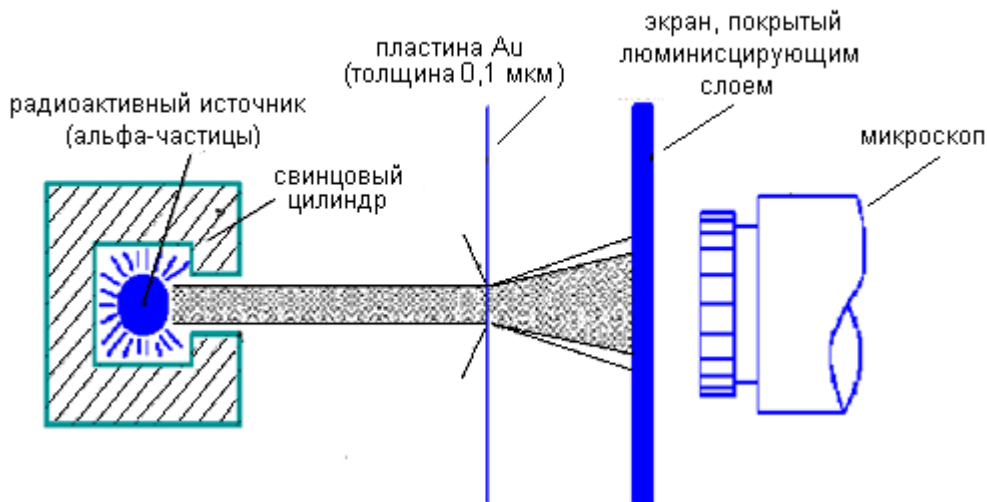


Рис. 91 – Опыт Резерфорда

В результате проведенных экспериментов, Резерфорд выяснил:

1. Большинство частиц проходит не рассеиваясь. Получил расстояние сближения $r \approx 10^{-15}$ м, а размер атома $d = 10^{-10}$ м, т.е. в 100000 раз $r < d_a$;

2. Редчайшие случаи отклонения частиц в обратную сторону.

Всё говорит о том, что положительный заряд атома и большая часть массы атома сосредоточена в очень малом объеме по сравнению с самим размером атома. Получается, что атом «рыхлый, пустой».

Эрнестом Резерфордом в результате эксперимента с рассеиванием альфа-частиц была предложена модель строения атома – *планетарная модель атома*. По этой модели атом состоит из небольшого положительно заряженного ядра, в котором сосредоточена почти вся масса атома, вокруг которого движутся электроны, – подобно тому, как планеты движутся вокруг Солнца.

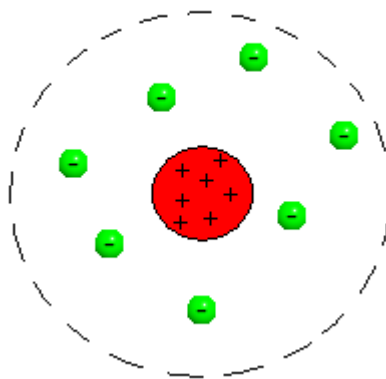


Рис. 92 – Планетарная модель Резерфорда

Недостатком планетарной модели была её *несовместимость* с законами классической физики. Если электроны движутся вокруг ядра как планеты вокруг Солнца, то их движение ускоренное, и, следовательно, по законам классической электродинамики они должны были бы излучать электромагнитные волны, терять энергию и падать на ядро. Следующим шагом в развитии планетарной модели стала *модель Бора*, постулирующая другие, отличные от классических, законы движения электронов. Полностью противоречия электродинамики смогла решить квантовая механика.

Постулаты Бора – основные допущения, сформулированные Нильсом Бором в 1913 году для объяснения закономерности линейчатого спектра атома водорода и водородоподобных ионов (формула Бальмера-Ридберга) и квантового характера испускания и поглощения света. Бор исходил из планетарной модели атома Резерфорда.

Постулаты:

1. Атом может находиться только в особенных стационарных или квантовых состояниях, каждому из которых отвечает определенная энергия. В стационарном состоянии атом не излучает электромагнитных волн;
2. Излучение света происходит при переходе атома из стационарного состояния с большей энергией в стационарное состояние с меньшей энергией. Энергия, излученного фотона, равна разности энергий стационарных состояний.

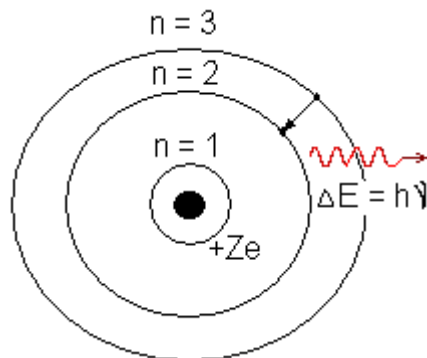


Рис. 93 – Модель атома Бора

Для получения энергетических уровней в атоме водорода в рамках модели Бора записывается второй закон Ньютона для движения электрона по круговой орбите в поле кулоновской силы притяжения:

$$\frac{m v^2}{r} = \frac{Z k e^2}{r^2}, \quad (4.38)$$

где m – масса электрона, e – его заряд, Z – заряд ядра и k – кулоновская константа, зависящая от выбора системы единиц

В 1911 году Резерфорд в своём докладе «Рассеяние α - и β -лучей и строение атома» в философском обществе Манчестера заявил:

«Рассеяние заряженных частиц может быть объяснено, если предположить такой атом, который состоит из центрального электрического заряда, сосредоточенного в точке и окружённого однородным сферическим распределением противоположного электричества равной величины. При таком устройстве атома α - и β -частицы, когда они проходят на близком расстоянии от центра атома, испытывают большие отклонения, хотя вероятность такого отклонения мала».

Таким образом, Резерфорд открыл атомное ядро, с этого момента и ведёт начало ядерная физика, изучающая строение и свойства атомных ядер.

После обнаружения стабильных изотопов элементов, ядру самого лёгкого атома была отведена роль структурной частицы всех ядер. С 1920 года ядро атома водорода имеет официальный термин – *протон*. После промежуточной протон-электронной теории строения ядра, имевшей немало явных недостатков, в первую очередь она противоречила экспериментальным результатам измерений спинов и магнитных моментов ядер, в 1932 году Джеймсом Чедвиком была открыта новая электрически нейтральная частица, названная *нейтроном*. В том же году Иваненко и, независимо, Гейзенберг выдвинули гипотезу о протон-нейтронной структуре ядра. Эта гипотеза была полностью подтверждена всем последующим ходом развития ядерной физики и её приложений.

Ядро атома состоит из *нуклонов* (от лат. nucleus – ядро): положительно заряженных *протонов* p^{+} и электронейтральных *нейтронов* n^0 . Нуклоны относятся к семейству *барионов* (группа N-барионов). Они являются самыми лёгкими из известных барионов.

Как уже говорилось ранее, *нейтрон* не имеет электрического заряда. *Протон* имеет положительный электрический заряд, равный по абсолютной величине заряду электрона. Об этом свидетельствует тот факт, что атомы нейтральны. Масса протона m_p точно известна из непосредственных масс-спектроскопических измерений; ее величина в 1836 раз больше массы электрона. Энергия покоя протона равна 938 Мэв. Масса нейтрона m_n известна из масс-спектроскопических измерений массы дейтона (который состоит из одного протона и одного нейтрона) и из измерения энергии связи этой частицы. Величина массы нейтрона немного превышает массу протона. Соответствующая разница между энергиями покоя нейтрона и протона порядка 1,3 Мэв.

Атомы классифицируются по количеству протонов и нейтронов в ядре: число протонов Z соответствует порядковому номеру атома в периодической системе Менделеева и определяет его принадлежность к некоторому химическому элементу, а число нейтронов N – определённому изотопу этого элемента. Число Z также определяет суммарный положительный электрический заряд (Ze) атомного ядра и число электронов в нейтральном атоме, задающее его размер.

Почти вся масса атома заключена в его ядре. Масса ядра складывается из масс всех нуклонов, входящих в ядро. Сумма протонов Z и нейтронов N ядра равна массовому числу атома, т.е. целому числу A , ближайшему к атомной массе (выраженной в а.е.м. – атомная единица массы (за а.е.м. принята 1/12 массы изотопа углерода C^{12})): $Z + N = A$. По массовому числу и атомному номеру химического элемента можно непосредственно определять число протонов и нейтронов, содержащихся в атомном ядре этого элемента.

Атомные ядра химических элементов принято обозначать символом ${}_Z^AX$, где X – символ элемента, A – массовое число, Z – атомный номер. Например: ${}_2^4He$ означает атомное ядро гелия, в котором содержится 2 протона и $4-2=2$ нейтрона.

Атомы, ядра которых состоят из одинакового числа протонов, но из различного числа нейтронов, называются *изотопами*. Так, у водорода имеется четыре изотопа: протий (H), дейтерий (D), тритий (T) и четырехнуклонный водород, не получивший пока специального названия.

Ядра – образования устойчивые $\bar{u} > \bar{d}$ действуют силы, удерживающие нуклоны внутри ядра. Данные силы называют *ядерными*. *Ядерные силы* – силы, с которыми взаимодействуют нуклоны в ядре, препятствующие кулоновским силам отталкивания. В ядре имеет место гравитационное притяжение, но оно в 10^{36} раз меньше кулоновских сил отталкивания $\bar{u} > \bar{d}$ это силы особой природы.

Свойства ядерных сил:

1. Являются *силами притяжения*;
2. *Короткодействующие* ($R \sim 10^{-15} \text{ м}$);
3. *Зарядовая независимость*. Ядерные силы действуют между двумя протонами или между протоном и нейтроном одинаково;
4. *Свойство насыщения*. Любой нуклон взаимодействует только с ограниченным числом ближайших к нему нуклонов, а не со всеми нуклонами ядра;
5. *Обратимость*. При уменьшении расстояния между нуклонами проявляют себя, как силы отталкивания.
6. Ядерные силы *не являются центральными*, т.е. действующим по линии, соединяющий центры взаимодействующих нуклонов.

Перечисленные свойства говорят о невероятной сложности ядерных сил. До сих пор не существует законченной теории о природе данного вида сил. Поэтому на данной стадии прибегают к рассмотрению приближенных ядерных моделей, в которых ядро заменяется некоторой модельной системой, довольно хорошо описывающей только определенные свойства ядра (например, *капельная, оболочечная*).

На опыте установлено, что масса любого ядра меньше суммы масс нуклонов его составляющих:

$$m_{\text{я}} < Z m_p + (A - Z) m_n \quad (4.41)$$

$$\Delta m = Z m_p + (A - Z) m_n - m_{\text{я}} \quad (4.42)$$

Выражение (4.42) называют *дефектом массы ядра*.

Как уже отмечалось, нуклоны прочно связаны в ядре атома ядерными силами. Для разрыва этой связи, т.е. для полного разобщения нуклонов, необходимо затратить некоторое количество энергии. Энергия, необходимая для разобщения нуклонов, составляющих ядро, называется *энергией связи ядра*.

$$E_{св} = \Delta m c^2, \quad (4.43)$$

где c – скорость света в вакууме.

Энергия связи ядра, приходящаяся на один нуклон, называется *удельной энергией связи ядра* ε :

$$\varepsilon = E_{св} / A \quad (4.44)$$

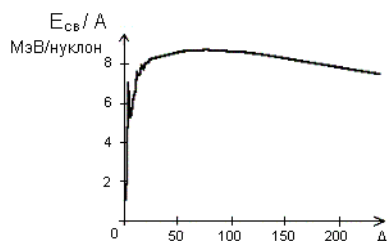


Рис. 94 – Зависимость удельной энергии связи ядра от массового числа

Энергия связи ядра водорода равна нулю, т.к. нечего разобщать. Удельная энергия связи максимальна у ядер ≈ 100 а.е.м. У легких ядер с увеличением A , энергия связи ядра возрастает $\hat{>}$ при слиянии легких ядер в тяжелые, энергия выделяется (*синтез*). При делении тяжелых ядер, энергия выделяется.

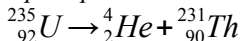
4.3.3 Естественная и искусственная радиоактивность. Ядерные реакции. Закон радиоактивного распада. Методы наблюдения и регистрации радиоактивных излучений

Стабильными называются ядра, состав которых со временем не меняется. Наиболее устойчивыми являются ядра легких элементов, состоящие из приблизительно одинакового числа протонов и нейтронов. У самых тяжелых элементов (расположенных в периодической таблице после свинца), ядра которых состоят из большого числа нуклонов (с преобладанием нейтронов), ядерные силы уже не обеспечивают устойчивости ядра. Такие ядра могут *самопроизвольно* распадаться, превращаясь в ядра более легких элементов. Это явление носит название *естественной радиоактивности* (была открыта в 1896 г. французским физиком Беккерелем). Своим открытием Беккерель делится с учёными, с которыми он сотрудничал. В 1898 г. Мария Кюри и Пьер Кюри обнаружили радиоактивность тория, позднее ими были открыты радиоактивные элементы полоний и радий. Они выяснили, что свойством естественной радиоактивности обладают все соединения урана и в наибольшей степени сам уран.

Рассмотрим несколько случаев типичной неустойчивости (неустойчивости). В него входят три различных вида излучения – α , β , γ – лучи.

1. α – *распад* – самопроизвольное превращение ядра с испусканием α частицы (${}^4_2\text{He}$). Энергетический спектр – линейчатый.

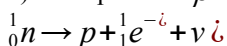
Пример:



В результате получается химический элемент, со смещением влево на две клетки в периодической таблице Д.И. Менделеева. При α – распаде, почти мгновенно испускаются несколько γ – квантов. Испускаемые α и γ – лучи определенные $\hat{>}$ спектр линейчатый.

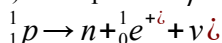
2. β – *распад*.

а) электронный β – *распад*. Пример:



В результате получается химический элемент, со смещением вправо на одну клетку в периодической таблице Д.И. Менделеева ($Z+1$).

б) позитронный β – *распад*. Пример:



В результате получается химический элемент, со смещением влево на одну клетку в периодической таблице Д.И. Менделеева ($Z-1$).

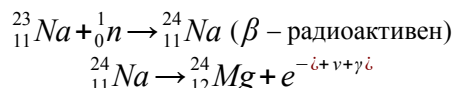
При β – *распаде* энергетический спектр сплошной.

3. Термин «гамма-распад» применяется редко; испускание ядром гамма-квантов называют обычно *изомерным* переходом. Гамма-излучение часто сопровождает другие типы распада, когда в *результате* первого этапа распада возникает дочернее ядро в возбуждённом состоянии, затем испытывающее переход в основное состояние с испусканием гамма-квантов.

Искусственная радиоактивность – радиоактивность изотопов, полученных в результате ядерной реакции.

Ядерная реакция – процесс превращения атомных ядер, обусловленный воздействием на них быстрых элементарных частиц (или ядер других атомов).

Любое стабильное ядро можно сделать искусственно радиоактивным, если вогнать в него избыточную частицу. Впервые это удалось Ф.Ж. Кюри в 1934 г. У легких ядер массовое число меньше пятидесяти ($A < 50$), если у них искусственно создать избыток нейтронов над протонами, то такие ядра становятся β – радиоактивными. Чаще всего для этой цели используют нейтрон, поскольку ему легче проникнуть в ядро (нет заряда).



В настоящее время известно более 1000 искусственных изотопов.

Для количественной характеристики воздействия ядерного излучения на организм используют *дозу излучения*. *Поглощенная доза излучения* – величина, равная отношению энергии излучения, переданной веществу к массе этого вещества. В СИ 1Гр(грэй) = 1 Дж/кг.

Разные виды излучения при одной дозе излучения могут вызвать разные биологические действия. Вводят *коэффициент качества* – во сколько раз данное излучение действует сильнее β, γ излучений.

Коэффициент качества умножают на дозу излучения получают *эквивалентную дозу излучения*. В СИ Зв (зиверт). 1 Зв – это излучение любого вида, действие которого на живую ткань эквивалентно действию 1 Гр.

Радиоактивный распад ведет к постепенному уменьшению числа атомов радиоактивного элемента. Он носит случайный характер в том смысле, что нельзя предсказать, когда и какой именно атом распадётся. Можно говорить только о *вероятности распада* каждого атома за определенный промежуток времени.

Число атомов dN , распадающихся за время dt пропорционально времени и числу атомов радиоактивного элемента:

$$dN = -\lambda N dt,$$

где λ – коэффициент пропорциональности, называемый *постоянной распада* данного элемента. Знак «минус» показывает уменьшение числа атомов радиоактивного элемента со временем.

$$\begin{aligned} \int_{N_0}^N dN &= -\int_0^t \lambda N dt \\ \int_{N_0}^N dN / N &= -\lambda \int_0^t dt \end{aligned}$$

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (4.45)$$

где N_0 – число атомов в начальный момент времени; N – число атомов по истечении времени t . Выражение (4.45), называется *законом радиоактивного распада*.

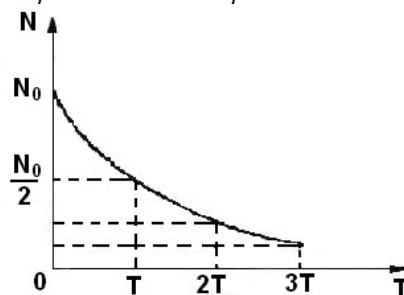


Рис. 95 – Закон радиоактивного распада

Для характеристики быстроты распада радиоактивного элемента вводится понятие периода полураспада. *Периодом полураспада T* называется время в течение которого количество атомов исходного элемента уменьшается вдвое.

$$e^{-\lambda T} = 1/2 \Rightarrow T = \ln 2 / \lambda = 0,693 / \lambda \quad (4.46)$$

Величина τ , обратно пропорциональная постоянной распада, представляет *среднее время жизни* радиоактивного атома:

$$\tau = 1 / \lambda \Rightarrow T = \tau \cdot \ln 2$$

Откуда:

$$\tau = T / \ln 2 = 1,44 T \quad (4.47)$$

Таким образом, среднее время жизни приблизительно в полтора раза больше периода полураспада.

$$N_t = N_0 e^{-\lambda t}$$

$$t = T$$

$$N_t = N_0 e^{-\lambda T}$$

$$1/2 N_0 = N_0 e^{-\lambda T}$$

$$\ln 2 = \lambda T$$

$$\lambda = \ln 2 / T$$

$$N_t = N_0 e^{-\ln 2 t / T}$$

$$N_t = N_0 2^{-t/T} \quad (4.48)$$

Формула (4.48) ещё одна запись закона радиоактивного распада.

Число атомных распадов, совершающихся в радиоактивном элементе за 1 с, называется *активностью* a этого элемента:

$$a = |dN / dt| \quad (4.49)$$

$$a = \lambda N = N \ln 2 / T \quad (4.50)$$

Таким образом, активность пропорциональна количеству элемента и обратно пропорциональна периоду. За единицу активности принята активность 1г радия, получившая название *кюри*:

$$1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ расп/с}$$

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

1.1 Лабораторная работа № 1 ЛР-1 Определение момента инерции шатуна

1.2 Лабораторная работа № 2 ЛР-2 Соударения упругих шаров

1.3 Лабораторная работа № 3 ЛР-3 Закон сохранения механической энергии

1.4 Лабораторная работа № 4 ЛР-4 Определение ускорения свободного падения тел с помощью математического маятника

1.5 Лабораторная работа № 5 ЛР-5 Изучение закона свободных колебаний упруго деформированного тела

1.6 Лабораторная работа № 6 ЛР-6 Определение коэффициента вязкости жидкости методом Стокса

- 1.7 Лабораторная работа № 7 ЛР-7** Определение относительной влажности воздуха с помощью психрометра
- 1.8 Лабораторная работа № 8 ЛР-8** Последовательное и параллельное соединение проводников
- 1.9 Лабораторная работа № 9 ЛР-9** Изучение зависимости сопротивления лампы накаливания от тока накаливания
- 1.10 Лабораторная работа № 10 ЛР-10** Цепи постоянного тока
- 1.11 Лабораторная работа № 11 ЛР-11** Определение длины волны света с помощью дифракционной решетки
- 1.12 Лабораторная работа № 12 ЛР-12** Изучение микроскопа
- 1.13 Лабораторная работа № 13 ЛР-13** Внешний фотоэффект
- 1.14 Лабораторная работа № 14 ЛР-14** Ядра атомов

2.1 Лабораторная работа № 1 (2 часа).

Тема: «Определение момента инерции шатуна»

2.1.1 Цель работы: Определить момент инерции шатуна используя теорему Штейнера

2.1.2 Задачи работы:

1. Применить теорему Штейнера на практике
2. Ознакомиться с понятием момента инерции твердого тела.

2.1.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

штатив с отвесом и горизонтальной осью, секундомер, шатун, крючки с нитями, масштабная линейка

2.1.4 Описание (ход) работы:

1. Значение массы шатуна выбито на шатуне в граммах. По этому значению вычислить вес шатуна в Ньютонах в положении равновесия.
2. Отметить на шатуне центр тяжести O . Для этого шатун подвесить на крючках так, как показано на рис. 1 а. Положение центра тяжести определится как точка пересечения отвесной линии с осью симметрии шатуна.

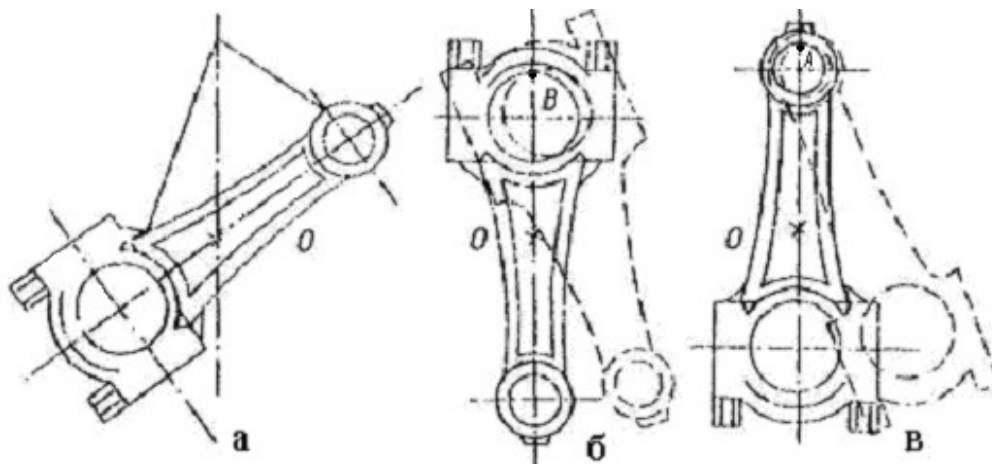


Рис. 1

3. Подвесить шатун так, как показано на рис. 1 б (ось вращения шатуна проходит через точку В) и, определив время десяти колебаний, найти период колебания шатуна T_B относительно оси, проходящей через точку В (шатун отклоняется от положения равновесия на $3-5^\circ$) $\left(T_B = \frac{t}{10}\right)$.

4. Измерить масштабной линейкой расстояние $r_{BO} = BO$.

5. Вычислить момент инерции шатуна относительно оси, проходящей через точку В (J_B) по формуле (2).

6. Подвесить шатун так, как это показано на рис. 1 в (ось вращения шатуна проходит через точку А), и аналогично описанному выше определить период колебаний шатуна (T_A), расстояние $r_{AO} = AO$ и вычислить момент инерции шатуна относительно оси, проходящей через точку А (J_A).

7. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу.

	m	p	n	t	T	r	J	J ₀
Относительно оси, проходящей через точку В.								
Относительно оси, проходящей через точку А.								

8. Вычислить J_0 шатуна: $J_O = J_A - r_{AO}^2 m$; $J_O = J_B - r_{BO}^2 m$ для двух положений шатуна и его среднее значение.

Найти абсолютную и относительную погрешности вычислений момента инерции шатуна J_0 относительно оси, проходящей через центр масс.

2.2 Лабораторная работа № 2 ЛР-2 Соударения упругих шаров

2.2.1 Цель работы: изучение законов сохранения импульса, используя компьютерную модель

2.2.2 Задачи работы:

1. Ознакомление с физическими демо-моделями

2.2.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. Компьютер с программным обеспечением, необходимым для выполнения работы

2.2.4 Описание (ход) работы:

1. Запустить на компьютере Физикон Виртуальный практикум по физике
2. Следовать пунктам меню программы
3. Составить отчет по работе

2.3 Лабораторная работа № 3 ЛР-3 Закон сохранения механической энергии

2.3.1 Цель работы: изучение законов сохранения энергии, используя компьютерную модель

2.3.2 Задачи работы:

1. Ознакомление с физическими демо-моделями

2.3.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. Компьютер с программным обеспечением, необходимым для выполнения работы

2.2.4 Описание (ход) работы:

1. Запустить на компьютере Физикон Виртуальный практикум по физике
2. Следовать пунктам меню программы
3. Составить отчет по работе

2.4 Лабораторная работа № 4 (2 часа).

Тема: «Определение ускорения свободного падения тел с помощью математического маятника»

2.2.1 Цель работы: Рассчитать ускорения свободного падения тел методом математического маятника

2.2.2 Задачи работы:

1. Ознакомиться с видами колебаний и их характеристиками
2. Расчет ускорения свободного падения

2.2.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

математический маятник переменной длины, секундомер, вертикальная шкала

2.4.4 Описание (ход) работы:

1. Определяют с помощью секундомера время 20 полных колебаний маятника и вычисляют период колебания маятника $T_1 = \frac{t_1}{N}$. Отмечают положение нити на шкале ℓ_1 (рис. 1).
2. Поднимают шарик на 15-20 см. По шкале определяют новое положение нити ℓ_2 .
Определяют $T_2 = \frac{t_2}{N}$ (разность отсчетов по шкале дает $\ell_2 - \ell_1$).
3. Вычисляют ускорение свободного падения по формуле (1.1). Вычисление ускорения свободного падения проводят не менее трех раз, используя при этом маятники различной длины.
4. Результаты измерений заносят в таблицу.

№ п/п	Число колебаний N	Время совершения колебаний t	Период колебания T	($\ell_2 - \ell_1$)	g
Для ℓ_1 длины					
Для ℓ_2 длины					

5. Находят абсолютную и относительную погрешности вычисления ускорения свободного падения.

2.5 Лабораторная работа № 5 (2 часа).

Тема: «Изучение законов свободных колебаний упругодеформированного тела»

2.3.1 Цель работы: Определить коэффициент жесткости пружины различными способами

2.3.2 Задачи работы:

1. Определить коэффициент жесткости пружины по колебаниям
2. Определить коэффициент жесткости пружины по деформациям

2.3.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

кронштейн с пружиной и со шкалой, набор грузов, секундомер.

2.3.4 Описание (ход) работы:

Задание 1. Изучение зависимости смещения пружинного маятника от величины деформирующей силы.

1. Укрепить на стойке кронштейн с пружиной так, чтобы стрелка указателя была при ненагруженной пружине в высшей точке шкалы. Отметить положение стрелки указателя на шкале (рис.).
2. Навесить на пружину один груз, записать в таблицу его массу и снова отметить положение стрелки на шкале. По разности показаний по шкале определить смещение x_1 , под действием данного груза m_1 .
3. Навешивая на пружину 2, 3 и т.д. грузы, записать в таблицу массы их и соответствующие смещения.

№ п/п	m	F	x	k	k_{cp}

4. По результатам опытов построить график зависимости деформирующей силы от смещения $F=f(x)$.
5. Вычислить величину $k = mg/x$, а затем рассчитать k_{cp} .

Задание 2. Изучение зависимости периода колебаний пружинного маятника от его массы.

1. Слегка оттянуть пружину с грузом и отпустить. С помощью секундомера определить

$$T_1 = \frac{t_1}{20}$$

время 20 полных колебаний маятника и рассчитать период колебания

2. Прodelать то же самое, навешивая 2 груза вместе, затем 3 груза и т.д.

№ п/п	m	n	t	T
1.				
2.				
3.				

3. Поданным опыта построить график зависимости периода T колебаний груза от его массы m ($T=f(m)$).

$$k' = \omega^2 m = \frac{4\pi^2 m}{T^2}$$

Задание 3. По формуле

рассчитать значение k' для 3-х нагрузок и вычислить k'_{cp} . Полученное значение k'_{cp} сравнить со значением k_{cp} , рассчитанным по деформации.

Расчет по колебаниям	Расчет по деформации
----------------------	----------------------

m	$k' = \frac{4\pi^2 m}{T^2}$	k_{cp}	$k = \frac{mg}{x}$	k_{cp}

2.6 Лабораторная работа № 6 (2 часа).

Тема: «Определение коэффициента вязкости жидкости методом Стокса»

2.6.1 Цель работы: ознакомиться с устройством прибора Стокса и определить коэффициент вязкости масла (подсолнечного, трансформаторного, машинного).

2.6.2 Задачи работы:

1. Ознакомиться с устройством прибора Стокса
2. Определить коэффициент вязкости масла

2.6.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

прибор Стокса, ареометр, пипетка, исследуемая жидкость (масло).

2.6.4 Описание (ход) работы:

Прибор Стокса представляет собой цилиндр, наполненный исследуемой жидкостью с двумя кольцевыми метками **М** и **Н**, которые могут перемещаться вдоль цилиндра.

Телами шарообразной формы служат капли воды, выпускаемые пипеткой на поверхность исследуемой жидкости. Верхняя кольцевая метка **М** устанавливается на расстоянии **6-8 см** от поверхности жидкости, чтобы шарик, приближаясь к кольцу, приобрел постоянную скорость. *Рассчитайте, через какое время движение капли воды станет равномерным, и какой путь пройдет капля.*

Расстояние между метками **М** и **Н** делают не менее **0,3 м**. Секундомер включается и выключается в момент прохождения шариком верхней и нижней меток.

Опыт повторяют не менее трех раз при одинаковом расстоянии между метками. Плотность воды и плотность масла находят ареометром, а затем сравнивают со значениями в справочнике.

По данным опыта вычисляют коэффициент вязкости η .

Результаты измерений и вычислений заносят в таблицу.

№	r, мм	S, м ²	t, с	ρ , кг/м ³	ρ_1 , кг/м ³	η , Па*с	η_{cp} , Па*с
1							
2							
3							

Значение радиуса шарика указано на установке.

Сформулируйте вывод по данной работе.

2.7 Лабораторная работа № 7 (2 часа).

Тема: «Определение относительной влажности воздуха с помощью психрометра»

2.7.1 Цель работы: определить относительную влажность воздуха помещения

2.7.2 Задачи работы:

1. Определить относительную влажность воздуха помещения расчетным путем
2. Определить относительную влажность воздуха помещения, используя таблицу

Еноховича

2.7.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

Психрометр, барометр-анероид

2.7.4 Описание (ход) работы:

1. Снять показания с сухого термометра T_1 . Конец термометра, обмотанного ватой, смачивают водой. После установления термодинамического равновесия (**5-7 минут**) снять показания с термометра - T_2 .
2. Результаты измерений и вычислений заносят в таблицу:

№ опыта	Измерения				Вычисления	
	T_1 , К	T_2 , К	P_H , Па	P_0 , Па	P , Па	f , %

3. В справочнике А. С. Еноховича найти психрометрическую таблицу.

Определить по вашим данным T_1 и T_2 относительную влажность воздуха и сравнить с вычисленной ранее.

4. Сформулируйте вывод по данной работе.

2.8 Лабораторная работа № 8 (2 часа).

Тема: «Последовательное и параллельное соединение проводников»

2.8.1 Цель работы: Выяснение соотношений между напряжением, токами, сопротивлениями при параллельном и последовательном соединении проводников, а также расчет мощностей на каждом из участков цепи и общей потребляемой мощности при тех же соединениях.

2.8.2 Задачи работы:

1. Сборка электрической цепи
2. Расчет напряжений, сил токов, сопротивлений при последовательном и параллельном соединениях

2.8.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1) амперметр, 2) вольтметр, 3) набор сопротивлений, 4) соединительные провода, 5) источник тока (12В).

2.8.4 Описание (ход) работы:

ЗАДАНИЕ 1:

1. Знакомятся с приборами, записывают основные технические характеристики измерительных приборов.
2. Определяют цену деления прибора, для многопредельных приборов определяют цену деления на каждом пределе.
3. Собирают схему (рис.3) последовательного соединения проводников.

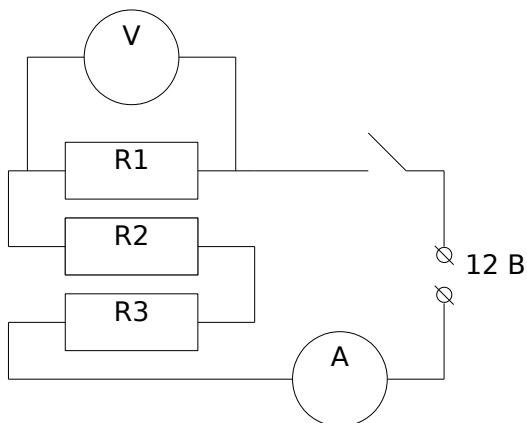


Рис.3

Вольтметр подключается параллельно тому участку, где нужно измерить напряжение.

4. Присоединяя провода к зажимам сопротивлений измеряют падение напряжения на каждом сопротивлении и в общей цепи. Измеряют силу тока (ток во всех участках должен быть одинаков).

Примечание: показания амперметра записывают при отключенном вольтметре.

5. Убеждаются, что $U = U_1 + U_2 + U_3$ и

$$R_1 = R_1 + R_2 + R_3$$

$$\left(R_1 = \frac{U_1}{I}; R_2 = \frac{U_2}{I}; R_3 = \frac{U_3}{I}; R = \frac{U}{I} \right)$$

где P – общая мощность ($P = P_1 + P_2 + P_3$)

P_i - мощность, развиваемая на отдельных участках.

$$(P_1 = IU_1, P_2 = IU_2, P_3 = IU_3)$$

6. Результаты измерений и вычислений записывают в таблицу.

Таблица 1

Соединение	U(B)	I(A)	P(Вт)	R(Ом)
последовательное				
Сопротивление 1				
Сопротивление 2				
Сопротивление 3				
Вся цепь (данные опыта)				
Вся цепь (вычисления)				

ЗАДАНИЕ 2:

1. Собирают схему (рис.4) и измеряют общее напряжение и общую силу тока.

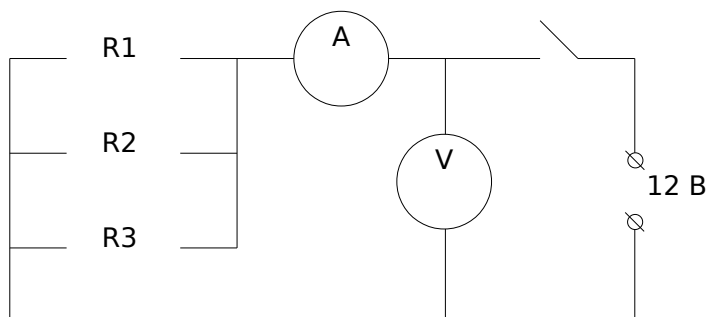
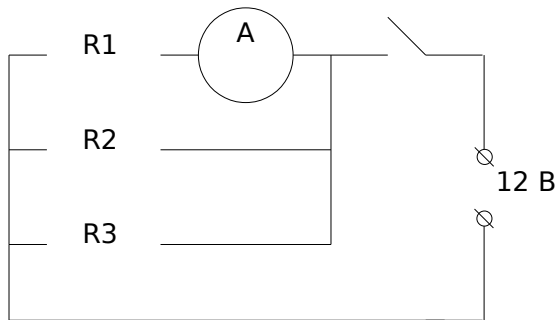


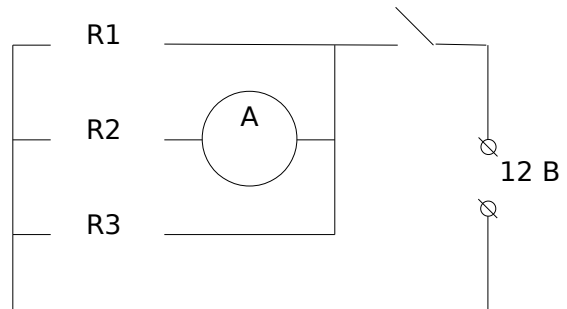
Рис.4

2. Измеряют ток в каждой ветви, включая амперметр в каждую ветвь как это показано на рис.5 (а и

б)



а)



б)

Рис.5

По аналогии со схемами «а» и «б» собирают схему для измерения тока в третьем сопротивлении, предварительно начертив и показав ее преподавателю.

3. Составляют таблицу для занесения данных, полученных при измерении характеристик проводников и токов при параллельном соединении.

4. Убеждаются, что ($U_{\text{об}} = U_1 = U_2 = U_3$, $I_{\text{об}} = I_1 + I_2 + I_3$)

$$R_{\text{теор}} = R_{\text{эсп}}; \quad \frac{1}{R_{\text{теор}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

5. Составляют отчет по работе и делают выводы.

2.9 Лабораторная работа № 9 (2 часа).

Тема: «Изучение зависимости сопротивления лампы накаливания от тока накаливания»

2.9.1 Цель работы: Изучить зависимость сопротивления лампы накаливания от тока накаливания

2.9.2 Задачи работы:

1. Сборка электрической цепи
2. Расчет сопротивления лампы накаливания при различной нагрузке

3. Построить графики зависимости тока от напряжения и сопротивления нити накаливания от тока ($I = f(U)$ и $R = f(I)$)

2.9.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. Электрическая лампочка 2. Потенциометр 3. Амперметр 4. Вольтметр

2.11.4 Описание (ход) работы:

1. Собрать схему (рис.1), включить в нее лампу накаливания с вольфрамовой нитью.

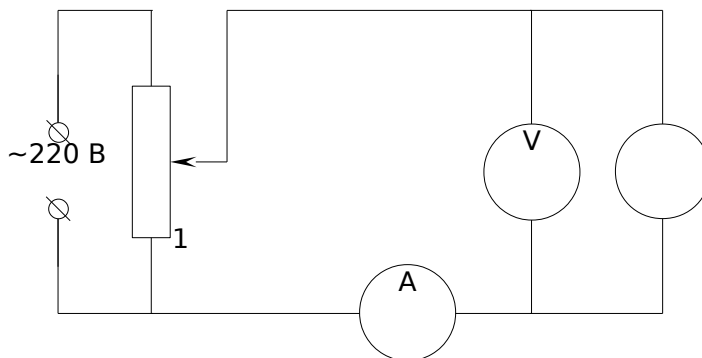


Рис.1

2. Поставить ползунок (подвижной контакт) потенциометра в положение 1, чтобы при включении схемы ток через лампу накаливания был бы минимальным.

3. После проверки схемы преподавателем подключить ее к источнику напряжения.

4. Постепенно увеличивая ток в лампе накаливания, снять показания вольтметра и амперметра для 6-8 точек.

5. По формуле (2) определить сопротивление нити.

6. Результаты измерения занести в таблицу.

№ п/п	Напряжение на лампе (В)	Ток через лампу (А)	Сопротивление лампы (Ом)
1.			
2.			
3.			

7. Построить графики зависимости тока от напряжения и сопротивления нити накаливания от тока ($I = f(U)$ и $R = f(I)$)

8. Сделать выводы.

9. Прodelать то же самое для другой лампы.

2.10 Лабораторная работа № 3 ЛР-3 Цепи постоянного тока

2.10.1 Цель работы: изучение законов постоянного тока, используя компьютерную модель

2.10.2 Задачи работы:

1. Ознакомление с физическими демо-моделями

2.10.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. Компьютер с программным обеспечением, необходимым для выполнения работы

2.10.4 Описание (ход) работы:

1. Запустить на компьютере Физикон Виртуальный практикум по физике
2. Следовать пунктам меню программы
3. Составить отчет по работе

2.11 Лабораторная работа № 11 (2 часа).

Тема: «Определение длины волны света с помощью дифракционной решетки»

2.11.1 Цель работы: Определить длину волны света с помощью дифракционной решетки

2.11.2 Задачи работы:

1. Рассчитать длину волны красного цвета с помощью дифракционной решетки
2. Сравнить расчетное значение длины волны с табличным

2.11.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

Выполнение работы.

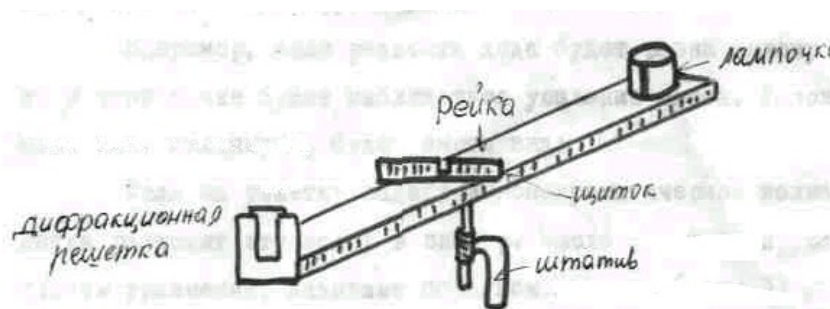


Рис. 2

Поместив дифракционную решетку в рамку, включите свет (напряжение 220в) и установив щиток с миллиметровой шкалой на 300-400мм, смотрите на свет лампы через дифракционную решетку.

В зависимости от числа штрихов на дифракционной решетке, на щитке можно видеть 2 или 3 пары дифракционных спектров.

порядки спектров

$K=2$ $K=1$ $K=1$ $K=2$

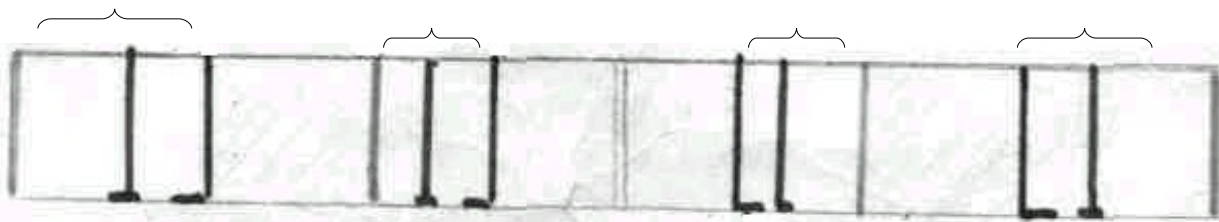


Рис. 3

Если спектры располагаются не параллельно шкале, то следует слегка повернуть рамку с решеткой. В данной работе определяют длины световых волн фиолетовых и красных лучей на грани их видимости. Для этого отсчитывают по шкале в первых спектрах, расположенных по обе стороны от окна, расстояние от середины до крайних фиолетовых и красных лучей. Если полученные значения у левого спектра отличны от соответственных значений у правого, то находят средние значения как для фиолетовых, так и для красных лучей (сумму делят на 2). Затем, по шкале на рейке определяют расстояние от щитка до дифракционной решетки, которая расположена на нулевом делении шкалы. Разделив расстояние a от середины шкалы щитка до наблюдаемого спектра на расстоянии l от щитка до дифракционной решетки, получают

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{a}{l}$$

угла, под которым виден данный спектр. Но $\operatorname{tg} \phi \approx \sin \phi$ при малых углах.

$$\sin \phi = \frac{a}{l}$$

Значит (5).

По уравнению дифракционной решетки $\sin \phi = K \lambda$ (6), где λ - длина искомой волны, K - порядок спектра и d - постоянная дифракционной решетки, равная 0,01 мм (или

0,02 мм), (см. надпись на дифракционной решетке), определяет $\lambda = \frac{d}{K} \sin \phi$ или

$\lambda = \frac{d \cdot a}{K \cdot l}$ Для получения более точных результатов необходимо брать возможно больше k .

Рассчитывают λ_k для красных и λ_ϕ для фиолетовых лучей. По результатам наблюдений составляют таблицу:

№ п/п	Цвет	a	l	K	$\sin \phi$	λ
1.	Красный					
2.	Красный					
3.	Фиолетовый					
4.	Фиолетовый					

Рассчитать $\lambda_{\text{ср к}}$ и $\lambda_{\text{ср ф}}$ и составить отчет по работе.

2.12 Лабораторная работа № 19 (2 часа).

Тема: «Изучение микроскопа»

2.12.1 Цель работы: изучить конструкцию и принцип действия микроскопа, используя компьютерную модель

2.12.2 Задачи работы:

1. Ознакомление с оптической схемой микроскопа
2. Моделирование схемы микроскопа из простых линз

2.12.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. Компьютер с программным обеспечением, необходимым для выполнения работы

2.12.4 Описание (ход) работы:

1. Запустить на компьютере Физикон Виртуальный практикум по физике
2. Следовать пунктам меню программы
3. Составить отчет по работе

2.13 Лабораторная работа № 13 ЛР-13 Внешний фотоэффект

2.13.1 Цель работы: изучить законы внешнего фотоэффекта, используя компьютерную модель

2.13.2 Задачи работы:

1. Ознакомление с установкой по изучению внешнего фотоэффекта

2.13.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. Компьютер с программным обеспечением, необходимым для выполнения работы

2.13.4 Описание (ход) работы:

1. Запустить на компьютере Физикон Виртуальный практикум по физике
2. Следовать пунктам меню программы
3. Составить отчет по работе

2.14 Лабораторная работа № 14 ЛР-14 Ядра атомов

2.14.1 Цель работы: изучить закон радиоактивного распада, используя компьютерную модель

2.14.2 Задачи работы:

1. Ознакомление с физической моделью стабильных и нестабильных ядер

2.14.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. Компьютер с программным обеспечением, необходимым для выполнения работы

2.14.4 Описание (ход) работы:

1. Запустить на компьютере Физикон Виртуальный практикум по физике
2. Следовать пунктам меню программы
3. Составить отчет по работе