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

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

Физика

Профиль подготовки: Кормление животных и технология кормов. Диетология

Квалификация (степень) выпускника: бакалавр

Нормативный срок обучения: 5 лет

Форма обучения: заочная полная

СОДЕРЖАНИЕ

1. КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

1.1 Лекция №1 (2 ч)

2.3 Тема: Физические основы механики. Молекулярная физика и термодинамика

1.1.1 Вопросы лекции:

1. **Предмет физики и законы физики. Динамика поступательного движения**
2. **Механическая работа, энергия, мощность**.
3. **Динамика вращательного движения**.
4. **Механические колебания и волны**.
5. **Элементы механики жидкостей**.
6. **Основы молекулярной физики и термодинамики**.
7. **Реальные газы и жидкости**.

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:

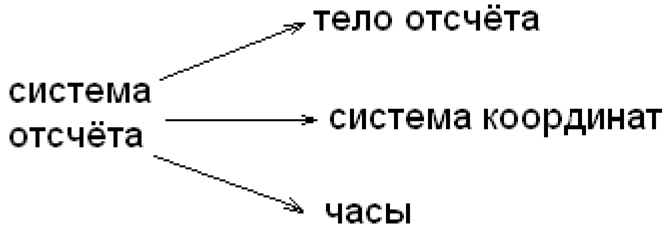
кинематика – изучает движение тел вне связи с причинами, которые изменяют это движение;

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).

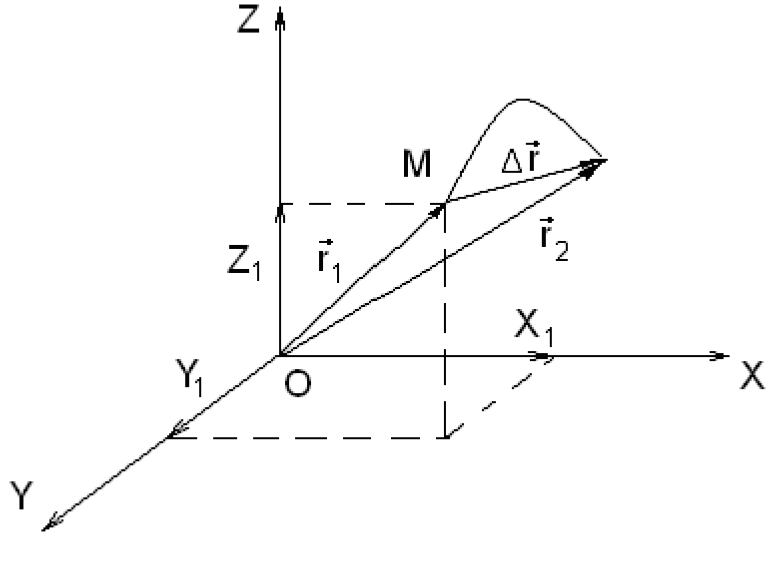


Рис. 1 – Координаты точки в декартовой системе координат

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

Проекция вектора $\vec{OM}$ 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) , или $\vec{r} = \vec{r}(t)$

z = z(t)

В векторной форме уравнения движения можно записывать в виде:

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

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).

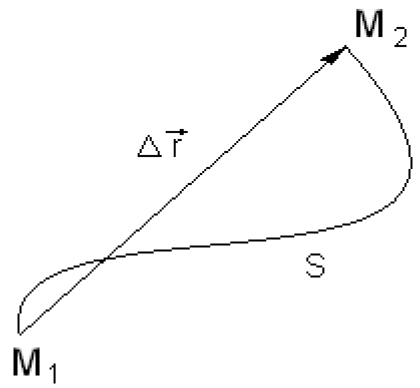


Рис. 2 – Траектория M_1M_2, путь *S*, вектор перемещения $\Delta\vec{r}$

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

Скорость материальной точки

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

$$\vec{\upsilon}_{cp} = \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}, \tag{1.2}$$

где $\Delta\boldsymbol{r}$ – приращение радиус-вектора.

Направление вектора средней скорости совпадает с направлением $\Delta\boldsymbol{r}$. Бесконечно уменьшая промежуток времени Δt, получим мгновенную скорость:

$$\upsilon = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t} = \frac{d\vec{r}}{dt} \tag{1.3}$$

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

$$\vec{\upsilon} = \frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{d\vec{s}}{dt} \tag{1.4}$$

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).

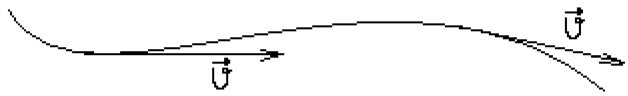


Рис. 3 – Направление вектора скорости

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

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 $\Delta\vec{\upsilon}$ к интервалу времени Δt :

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

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

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

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

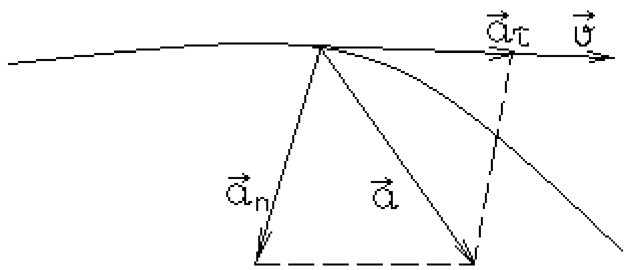


Рис. 4 – Полное ускорение и его составляющие

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

$$a_n = a_ц = \frac{\upsilon^2}{r}, \quad (1.7)$$

где $a_ц$ – центростремительное ускорение.

a_τ – характеризует изменение скорости по величине:

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

a – полное ускорение, которое определяется по формуле:

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

В скалярной форме:

$$a = \sqrt{a_n^2 + a_\tau^2} \tag{1.10}$$

Ускорение в СИ измеряется в м/с^2.

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 $\upsilon = \upsilon_0 \pm at$; $s = \upsilon_0 t \pm \dfrac{at^2}{2}$.

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 $\Delta\varphi$. $\Delta\varphi$ – угол поворота радиус-вектора $\vec{r}$ вокруг точки *O* (рис. 5).

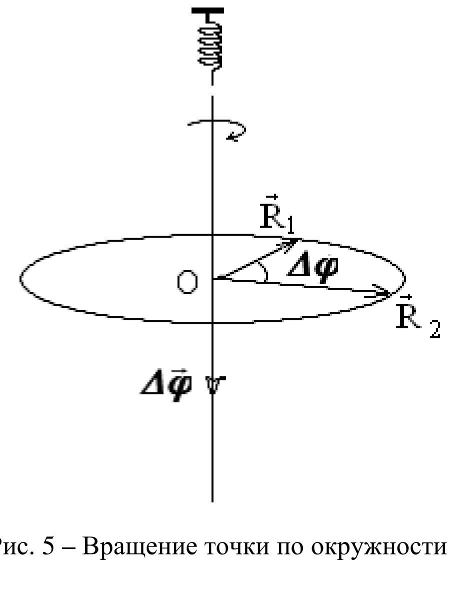


Рис. 5 – Вращение точки по окружности

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

Особенности псевдовекторов:

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

Угловая скорость

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

$$\vec{\omega} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \vec{\varphi}}{\Delta t} = \frac{d\vec{\varphi}}{dt} \tag{1.10}$$

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.

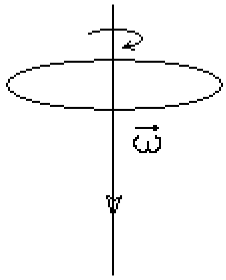


Рис. 6 – Направление угловой скорости

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

$$\Delta\varphi = 2\pi N \tag{1.11}$$

$$\omega = 2\pi n, \tag{1.12}$$

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

$$n = \frac{1}{T} \tag{1.13}$$

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:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \tag{1.14}$$

Угловое ускорение

Угловое ускорение – первая производная угловой скорости по времени:

$$\vec{\beta} = \frac{d\vec{\omega}}{dt} \tag{1.15}$$

$\vec{\beta}$ – 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/$с^2$.

1.1.7 Связь между линейными и угловыми характеристиками при вращательном движении

1) $s = r\varphi$
2) $\upsilon = r\omega$

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
υ	ω
$\upsilon = \upsilon_0 + at$	$\omega = \omega_0 \pm \beta t$
$s = \upsilon_0 t \pm \dfrac{at^2}{2}$	$\varphi = \omega_0 t \pm \dfrac{\beta t^2}{2}$

Динамика поступательного движения.

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

I закон Ньютона. 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:

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

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:

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

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

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

$$\vec{F} = k\frac{q_1 q_2}{r^3}\vec{r} + q\left[\vec{\upsilon}\vec{B}\right], \qquad (2.3)$$

где $k = 9 \cdot 10^9\, м / Ф$ – 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 З а к о н Н ь ю т о н а – основной закон динамики поступательного движения. *Ускорение, приобретаемое телом, прямо пропорционально действующей на тело силе и обратно пропорционально массе этого тела:*

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m} \tag{2.12}$$

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:*

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}, \tag{2.13}$$

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.

Импульс тела. Закон сохранения импульса в изолированной системе

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

$$\vec{P} = m\vec{\upsilon} \tag{2.14}$$

Согласно второму закону Ньютона $\vec{F} = m\vec{a} = m\dfrac{d\vec{\upsilon}}{dt} = \dfrac{d(m\vec{\upsilon})}{dt}$.

Поскольку:

$$\vec{P} = m\vec{\upsilon} \Rightarrow \vec{F} = \frac{d\vec{P}}{dt} \tag{2.15}$$

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

В СИ импульс тела измеряется в $кг\dfrac{м}{с}$.

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:

$$\frac{d\vec{P}}{dt} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \ldots + \vec{F}_n, \tag{2.16}$$

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

В случае отсутствия внешних сил (изолированная система) $\sum_{i=1}^{n} \vec{F}_i = 0 \Rightarrow \frac{d\vec{P}}{dt} = 0$.

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

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.

2. **Механическая работа, энергия, мощность**.

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

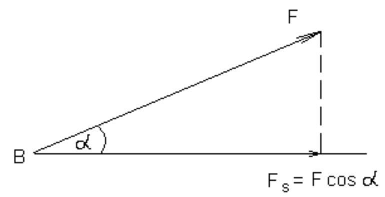


Рис. 7

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:

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

Работа силы при $0 \langle \alpha \langle 90^0$ положительна, т.е. сила вызывает перемещение тела; при $90^0 \langle \alpha \langle 180^0$ отрицательна, т.е. сила препятствует движению тела.

Если $\alpha = 90^0$, то в этом случае сила не совершает работы по перемещению тела, а если направление силы и перемещения совпадают $\alpha = 0^0 \Rightarrow A_{max} = F \cdot S$.

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 $\Delta S_1, \Delta S_2 ... \Delta S_n$, чтобы силы, действующие на каждом из них, можно было считать постоянными и равными $F_1, F_2 ... F_n$.

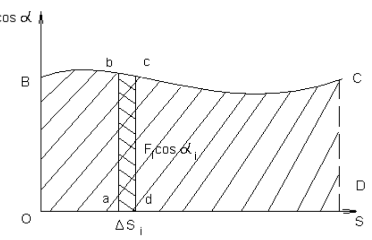


Рис. 8

Полная работа на всем пути:

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

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:

$$A = \int_{O}^{OD} F dS \cos\alpha \qquad (5.3)$$

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:

$$N = \frac{A}{t} \tag{5.4}$$

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

$$N = \frac{F\Delta S}{\Delta t} = F\upsilon \tag{5.5}$$

В СИ единицей измерения мощности является ватт (Вт).

Энергия. Кинетическая и потенциальная энергия. Связь энергии с работой

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:

$$E_k = \frac{m\upsilon^2}{2} \tag{5.6}$$

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

Потенциальная энергия.

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 $F_у = -k\Delta x$ – Закон Гука.

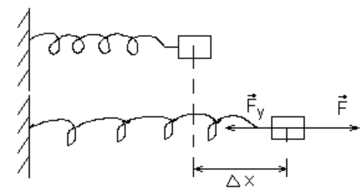


Рис. 9

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

Таким образом $E_п = \frac{kx^2}{2}$ – потенциальная энергия сжатой пружины или энергия упругой деформации ($E_п$ определяется координатой x).

$$A = E_{п1} - E_{п2} = -\Delta E_п \tag{6.1}$$

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.

Потенциальная энергия гравитационного взаимодействия

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

Рис. 10

На тело m действует сила $F = \gamma \frac{mM}{r^2}$, 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* (таковым 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

3. Динамика вращательного движения.

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

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*.

Момент силы

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

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

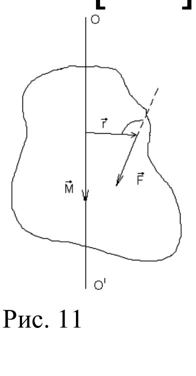


Рис. 11

$\vec{M}$ – 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.

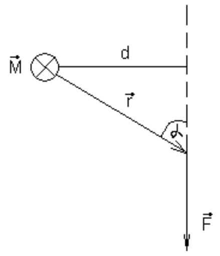


Рис. 12

Таким образом:

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

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 $Н \cdot м$.

8.3. Основное уравнение динамики вращательного движения

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

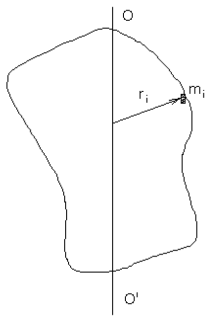


Рис. 13

Запишем второй закон Ньютона для массы m_i: $F_i = m_i a_i$. Заменим $a_\tau = [\ \beta r\ ]$ 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:

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

Т.о момент силы равен произведению момента инерции тела на его угловое ускорение:

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

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.

Момент инерции твёрдого тела. Способы его вычисления.

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

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

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

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

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

Пример 2. Момент инерции диска.

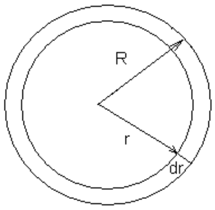


Рис. 15

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

$$I_д = \frac{1}{2} MR^2 \qquad (8.7)$$

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

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

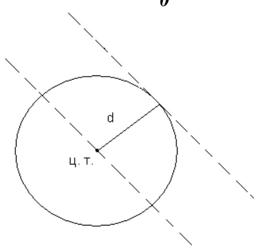


Рис. 16

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 путём: используя закон сохранения энергии; период колебания физического маятника $T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{mgr}}$ и т.д..

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

*Момент импульса**.** Закон сохранения момента импульса.*

Уравнение динамики вращательного движения можно записать в другом виде $\vec{M} = I \cdot \vec{\beta} = I\frac{d\vec{\omega}}{dt} \Rightarrow \vec{M} = \frac{d(I\vec{\omega})}{dt}$. Величина $I\vec{\omega}$, 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 (*закон сохранения момента импульса*). Если система изолированная, то $\sum_{i=1}^{n} M_i = 0 \quad \Rightarrow$

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

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.

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:

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

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

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):

$$E_k = \frac{m v^2}{2} + \frac{I\omega^2}{2} \qquad (9.3)$$

Данное положение учитывают при решении многих практических задач.

Аналогия формул поступательного и вращательного движения

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

4. 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 колеблющееся 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.

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

Гармоническое колебательное движение и его характеристики.

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

$$x = A\sin(\omega t + \varphi_0) \quad (10.1)$$

где x – смещение колеблющейся точки;

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

ω – круговая (циклическая) частота;

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

Т – 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).

$(\omega t + \varphi_0)$ – 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:

$$\upsilon = \frac{dx}{dt} = A\omega(\cos + \varphi_0) \quad (10.5)$$

Ускорение колеблющейся частицы первая производная скорости по времени:

$$a = \frac{d\upsilon}{dt} = -A\omega^2 \sin(\omega t + \varphi_0) = -\omega^2 x \quad (10.6)$$

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

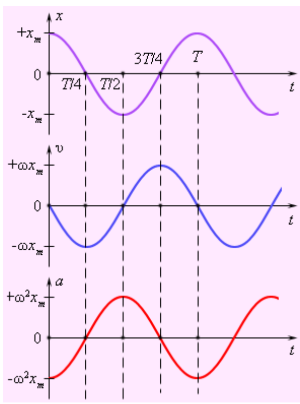


Рис. 17

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

Пружинный маятник – это груз массой m, подвешенный на абсолютно упругой пружине и совершающий гармонические колебания. $F_y = -kx$

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

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

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

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

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

$$mg\sin\alpha = F_в$$

$$mg\sin\alpha = -kx = F_в$$

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

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

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

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.

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

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

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 физического маятника.

10.3. Полная энергия гармонического колебания

Энергия тела массой m, колеблющегося под действием упругой силы в любой момент складывается из кинетической энергии $E_к = \frac{m\upsilon^2}{2}$ и потенциальной $E_к = \frac{kx^2}{2}$, т.е. $E_п = \frac{m\upsilon^2}{2} + \frac{kx^2}{2}$.

Заменим $\upsilon = A\omega(cos + \varphi_0)$ и $x = A\sin(\omega t + \varphi_0)$, а также учитывая, что $k = m\omega^2$ получим:

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

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

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.

Свободные, затухающие и вынужденные колебания. Резонанс. Сложение гармонических колебаний.

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.

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

(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.

Затухающие колебания

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

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

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

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

где x – смещение; A_o – 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:

$$k = \frac{A(t)}{A(t+T)} \qquad (11.4)$$

$$\lambda = \ln k \qquad (11.5)$$

(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:

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

Коэффициент затухания зависит от массы и сопротивления среды:

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

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:

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

Проводя соответствующие преобразования, получаем решение данного уравнения:

$$x = \frac{F_0}{m(\omega_0^2 + \omega_в^2)} \sin \omega_в t \quad (11.9)$$

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

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:

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

И тогда:

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

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:

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

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

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:

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

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

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

Фазовая скорость – это скорость, с которой двигается 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.

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

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

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

где $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ называется *волновым числом*. λ

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 $I \sim kA^2$.

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 изменяется во времени.

Уравнение стоячей волны:

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

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.

5. 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 с ж и м а е м а: 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 в я з к а: 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 *и д е а л ь н о й ж и д к о с т ь ю.*

Такой жидкости в природе естественно нет. Но коэффициент вязкости таких жидкостей как вода, ацетон, спирт, эфир относительно невелик при температуре выше 0^0 С. 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) $\eta = 0$

Основные понятия механики жидкостей

П о т о к – 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 твердого тела, а жидкости.

Л и н и я т о к а - 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.*

Уравнение неразрывности струи

$$S\upsilon = const \qquad (13.1)$$

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 брандспойнта, больше чем в шланге и т.п.

Величина $Q = S \cdot \upsilon$, численно равная объёму жидкости, протекающей в единицу времени через поперечное сечение потока, называется *объёмным расходом жидкости*. Измеряется в м^3/с.

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

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

Уравнение Бернулли и его применение

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

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

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:

$$\frac{\rho\upsilon^2}{2} + \rho gh + P = const \qquad (14.2)$$

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 м^2.

Па = Н/м^2 = Н$*$м / м^3=Дж / 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 $\dfrac{\rho\upsilon^2}{2}$ - 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:

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

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

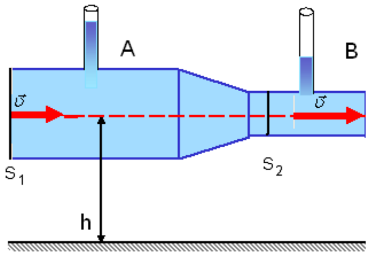
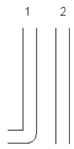


Рис. 25

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:

$$P_{дин} = P - P_{ст} \qquad (14.4)$$



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 скорость течения: $P_{дин} = \frac{\rho v^2}{2} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2P_{дин}}{\rho}}$.

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.

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 объём есть величина постоянная:

$$PV = const \tag{1.1}$$

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

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

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \tag{1.2}$$

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 объёме изменяется линейно с температурой:

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} \tag{1.3}$$

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).

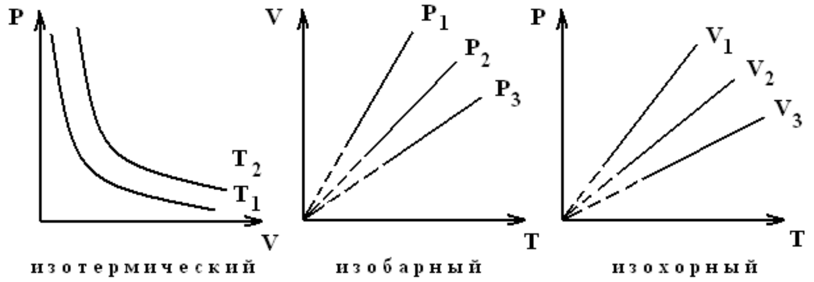


Рис. 1

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

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

$$P = \frac{2}{3} n \overline{E}_k \tag{2.1}$$

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

$$\overline{E}_k = \frac{m\,\overline{\upsilon}^2_{кв}}{2}$$ – средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул, $\overline{\upsilon}^2_{кв} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\upsilon_i^2$ – 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):

$$T = \frac{2\overline{E}_k}{3k} \tag{2.2}$$

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

Т =0 К – это та температура, при которой поступательное движение молекул должно замирать. 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 Т близких к нулю не укладывается в рамки классических представлений, а описывается квантовыми законами.

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

Уравнение состояния идеального газа. Уравнение Менделеева – Клапейрона.

$$P = nkT \tag{2.6}$$

(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.

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

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

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

$$PV = \frac{M}{\mu}RT \tag{2.7}$$

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).

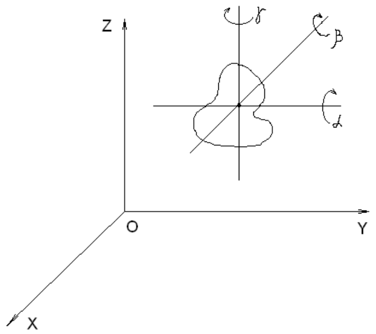


Рис. 5

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:

$$E = \frac{i}{2}kT \tag{2.8}$$

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 = $3_{пост} + 3_{вр} = 6$.

1) Если молекула одноатомная (O, N …) то i=3 (молекула подобна материальной точке)$\Rightarrow$ $E = \frac{3}{2}kT$.

2) Если молекула двухатомная (O_2, N_2 …), то у неё нельзя не учитывать вращательную энергию ($E_{полн} = \frac{m\upsilon^2}{2} + \frac{I\omega^2}{2}$), 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 (H_2O, N_2O …) имеет 6 степеней свободы i=6 $\Rightarrow$ $E = \frac{6}{2}kT = 3kT$.

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:

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

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

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

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 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).

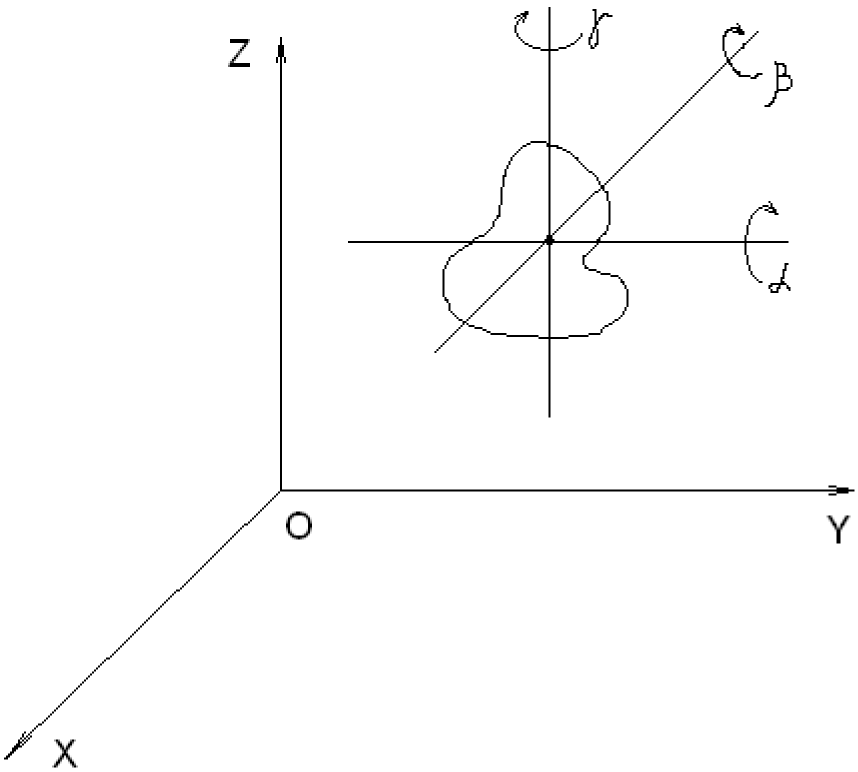


Рис. 2 – Число степеней свободы

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:

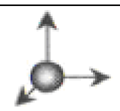
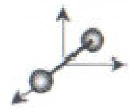
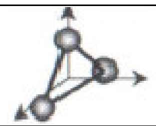
$$E = \frac{1}{2}kT$$

А полная кинетическая энергия молекул идеального газа:

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

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 …), то $i = 3$ (молекула подобна материальной точке) $\Rightarrow$ $E = \frac{3}{2}kT$.

5) Если молекула двухатомная (O_2, N_2 …), то у неё нельзя не учитывать вращательную энергию ($E_{полн} = \frac{m\upsilon^2}{2} + \frac{I\omega^2}{2}$), 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 OY ($I = 0$), значит, двухатомная молекула имеет $i = 3 + 2 = 5$ – пять степеней свободы $\Rightarrow$ $E = \frac{5}{2}kT$.

6) Трёхатомная и многоатомная молекула (H_2O, N_2O …) имеет 6 степеней свободы i=6 $\Rightarrow$ $E = \frac{6}{2}kT = 3kT$.

6.Основы молекулярной физики и 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.

I. 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:

$$\boldsymbol{\Delta U = Q - A} \qquad (1.1)$$

$$\boldsymbol{Q = \Delta U + A \Rightarrow A = Q - \Delta U} \qquad (1.2)$$

Если система периодически возвращается в исходное состояние, то изменение её внутренней энергии равно нулю $\Rightarrow \boldsymbol{A = Q}$. 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 $\boldsymbol{Q}$ – это количество энергии отданное, или принятое телом (системой). Передача тепловой энергии возможна: конвекцией, излучением, теплопроводностью.

$$\boldsymbol{Q = Cm\Delta T} \qquad (1.3)$$

Теплоемкость тела С – 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.

$$C_{уд} = \frac{Q}{m\Delta T} \tag{1.4}$$

Существует понятие *мольной теплоемкости* C_μ – количество теплоты, необходимое для нагревания одного моля вещества на 1 Кельвин.

$$C_\mu = \frac{Q}{\frac{m}{\mu}\Delta T} \tag{1.5}$$

Внутренняя энергия

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

$$\Delta U = \frac{i}{2}\frac{M}{\mu}R\Delta T \tag{1.6}$$

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. Объём газа V. Если сообщить газу энергию Q, то он, нагреваясь, должен расширяться так, что его объем увеличится на ΔV.

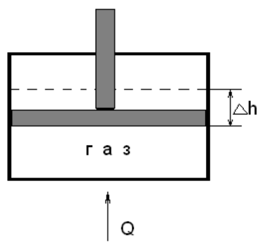


Рис. 8

Работа $A = \int_1^2 Fdh$, так как $F = PS$, $\Rightarrow A = \int_1^2 PSdh = \int_1^2 PdV$.

$$A = \int_1^2 PdV \tag{1.7}$$

В случае если $P = const$:

$$A = P\Delta V \tag{1.8}$$

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

Адиабатический процесс. Уравнение Пуассона. Коэффициент Пуассона.

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

$$dU = \delta A \tag{3.1}$$

Внутренняя энергия меняется только за счёт совершения работы.

Опыт с «воздушным огнивом». 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.

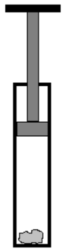


Рис. 9

$$PV^{\gamma} = const \tag{3.2}$$

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.

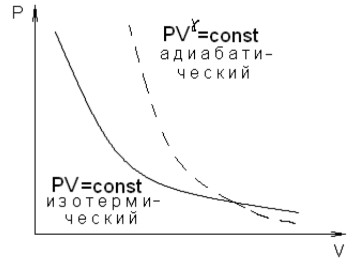


Рис. 10

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.

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.

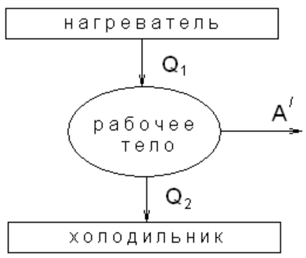


Рис. 11

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:

$$\eta = \frac{A'}{Q_1} = \frac{|Q_1| - |Q_2|}{|Q_1|} \langle 1 \qquad (4.1)$$

Изотермы Ван-дер-Ваальса и экспериментальные изотермы Эндрюса

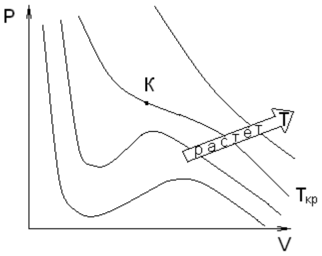


Рис. 15

На рисунке 15 представлены теоретические изотермы Ван – дер – Ваальса. Точка перегиба К 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 $T \rangle T_{кр}$ никаким сжатием газ нельзя перевести в жидкое состояние. При температурах выше $T_{кр}$ изотермы реального газа похожи на изотермы идеального газа.

7. Реальные газы и жидкости.

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 31^0С (304 К). До этой температуры изотермы имели вид гиперболы, что соответствовало изотермам идеального газа. Ниже 304 К 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.

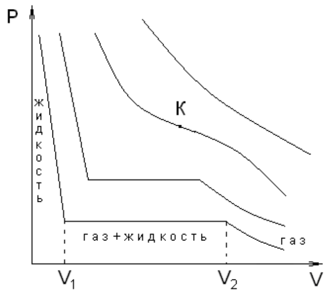


Рис. 16

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

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.

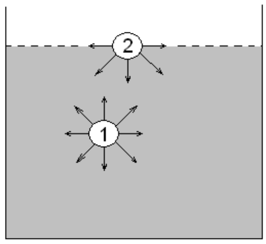


Рис. 17

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.

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

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:

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

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 1м²:

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

$[\alpha]$ = Дж/м² = 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.

1.2 Лекция №2 (2 ч)

Тема: Электричество и электромагнетизм

1.2.1 Вопросы лекции:

1. **Электростатика.**
2. **Постоянный электрический ток**.
3. **Работа и мощность тока**.
4. **Магнитное поле.**
5. **Электромагнитная индукция.**
6. **Магнитные свойства вещества.**
7. **Электромагнитные волны.**

1.2.2 Краткое содержание вопросов

1. Электростатика.

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, наэлектризованными. 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.

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).

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

В СИ $k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$ ($\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}\frac{\text{Ф}}{\text{м}}$ – 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:

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0}\cdot\frac{q_1\cdot q_2}{r^2} \tag{1.2}$$

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

В векторной форме закон Кулона:

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0}\cdot\frac{q_1\cdot q_2}{r^2}\cdot\frac{\vec{r}}{r} \tag{1.3}$$

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

Данная запись закона Кулона позволяет определить направление силы.

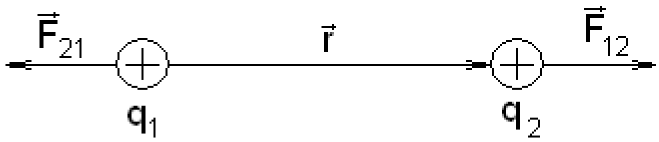


Рис. 1 – Взаимодействие зарядов

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

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.*

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \tag{1.4}$$

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 $\vec{F}$.

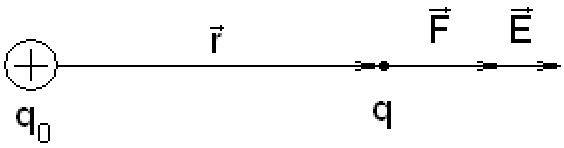


Рис. 2 – Направление вектора напряженности

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*.

$$\varphi = E_n/q \tag{1.5}$$

Потенциал является скалярной, энергетической характеристикой электростатического поля.

Потенциал в СИ измеряется в Вольтах (В)

$$1B = \frac{Дж}{Кл}$$

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

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 образованно одним зарядом, то сила F может быть определена из закона Кулона:

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$

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

$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0} \cdot \frac{q_0 \cdot q}{r^2} = \frac{1}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0} \cdot \frac{q_0}{r^2} \tag{1.6}$$

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.

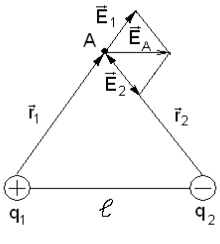


Рис. 3 – Электростатическое поле, созданное двумя зарядами

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

$$\vec{E}_A = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 \tag{1.7}$$

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 $q_1(E_+)$ и отрицательными зарядами $q_2(E_-)$

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

Ели 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*.

$$\vec{E}_{об} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \ldots + \vec{E}_n \tag{1.8}$$

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).

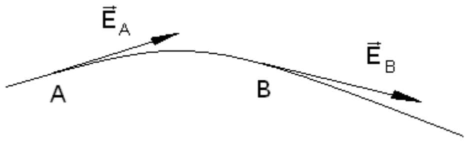


Рис. 4 – Силовые линии электростатического поля

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*.

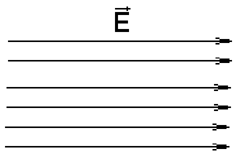


Рис. 5 – Однородное электростатическое поле

Примеры графического изображения электростатических полей.

1. Поле точечного заряда.

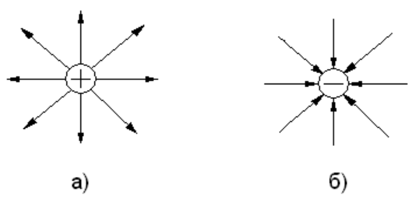


Рис. 6 – а) поле точечного положительного заряда
б) поле точечного отрицательного заряда

2. Поле двух разноименных зарядов.

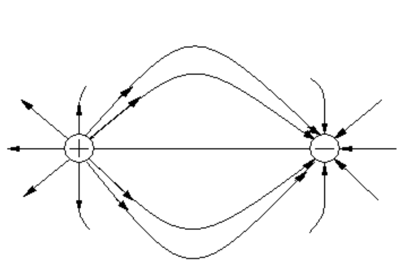


Рис. 7 – Графическое изображение электростатического поля диполя

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

$$N = E \cdot S \cdot \cos\alpha \tag{1.9}$$

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

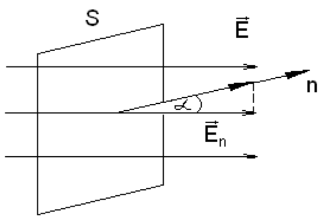


Рис. 8 – Поток вектора напряженности

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:

$$dN = E \cdot dS \cdot \cos\alpha \tag{1.10}$$

Тогда полный поток равен:

$$N = \int_S E \cdot dS \cdot \cos\alpha = \int_S E_n dS$$

$$N = \oint_S E_n dS \tag{1.11}$$

Выражение 1.11 - поток вектора напряженности E через замкнутую поверхность S.

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.

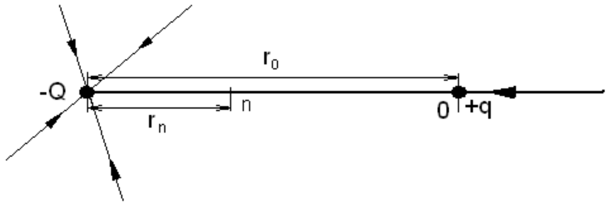


Рис. 11 – Работа перемещения точечного положительного заряда

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

$$F = \frac{Qq}{4\pi\varepsilon_0 r^2}, \tag{1.17}$$

где r – переменное расстояние между зарядами.

По определению:

$$A = -\int_{r_0}^{r_n} F \cdot dr = -qQ\int_{r_0}^{r_n} \frac{dr}{4\pi\varepsilon_0 r^2} \tag{1.18}$$

$$A = q\left(\frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r_n} - \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r_0}\right) \tag{1.19}$$

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 ($-\dfrac{Qq}{4\pi\varepsilon_0 r}$) представляет собой потенциальную энергию $E_п$ заряда в данной точке поля:

$$E_n = -\frac{Qq}{4\pi\varepsilon_0 r} \tag{1.20}$$

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*.

$$\varphi = \pm\frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r} \tag{1.21}$$

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

Подставим формулу (1.21) в (1.19):

$$A = q(\varphi_0 - \varphi_n) \tag{1.22}$$

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

$$\varphi_0 - \varphi_n = A \tag{1.23}$$

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:

$$\varphi_0 = \frac{A}{q} \tag{1.24}$$

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

$$1 B = 1\frac{Дж}{Кл}$$

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):

$$\oint_L dA = 0 \tag{1.25}$$

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:

$$\oint_L Edl\cos\alpha = \oint_L E_l dl = 0 \tag{1.26}$$

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 Электроемкость. 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 $q \sim \varphi$.

Таким образом:

$$q = C \cdot \varphi, \tag{1.31}$$

где *C* – коэффициент пропорциональности, называемый электроем-костью проводника.

Электроемкость 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.

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

$$\text{C} = \frac{q}{\varphi} \tag{1.31}$$

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

$$\Phi = \text{Кл}/\text{В}$$

Емкостью в 1 Ф обладает уединенный проводящий шар радиусом в $9 \cdot 10^6$ км. Это достаточно большая электроемкость, поэтому на практике используют $1\ \text{мк}\Phi = 10^{-6}\Phi$, $1\text{п}\Phi = 10^{-12}\Phi$, что соответствует емкостям уединенных проводящих шаров радиусами 9 км и 0,9 см.

Проводник, обладающий большой электроемкостью, должен иметь очень большие размеры. На практике нас интересуют такие системы, в которых поле сосредоточено в некотором объеме, обладающие большой емкостью 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*.

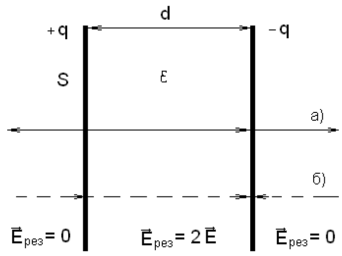


Рис. 16 – Плоский конденсатор

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.

Электроемкость плоского конденсатора:

$$\text{C} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}, \tag{1.32}$$

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

2.Постоянный электрический ток.

В электродинамике – разделе учения об электричестве, в котором рассматриваются явления и процессы, обусловленные движением электрических зарядов или макроскопических заряженных тел, - ванейшим 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:

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \tag{2.1}$$

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

$$I = \frac{Q}{t} \tag{2.2}$$

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):

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

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/м^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.

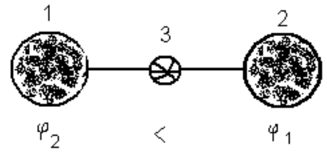


Рис. 18 – Соединение двух проводников разных потенциалов

Свободные носители начнут движение с шара большего потенциала φ_1 к шару с меньшим потенциалом φ_2. Спустя некоторое время потенциалы выравнятся 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.

$$F_к = qE_к$$
$$F_с = qE_c$$
$$A = q\oint_L (E_к + E_c)\, dL$$

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

$$A = q\oint_L E_к\, dL$$

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 ($\mathcal{E}$) – 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 $I \sim U => I = kU$, 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). 1Ом 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.

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

где l – длина проводника, м; S – площадь поперечного сечения, м^2; 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:

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

где R_0 – сопротивление проводника при 0^0C, t – температура, α - температурный (термический) коэффициент сопротивления. Единица измерения α в СИ – К$^{-1}$.

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

При очень низких температурах (0,14 – 20 К), 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 φ_1 - φ_2.

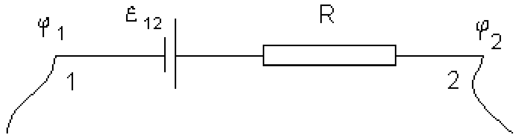


Рис. 19 – Неоднородный участок цепи

φ_1 - φ_2 – разность потенциалов (удельная работа кулоновских сил);

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

IR_{12} – U напряжение (полная удельная работа кулоновских и сторонних сил).

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

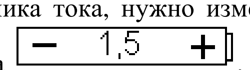
Выражение (2.9) представляет собой закон *Ома для неоднородного участка цепи в интегральной форме*, который является *обобщенным законом Ома*.

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:

$$IR = \varphi_1 - \varphi_2 = U => I = \frac{U}{R} \qquad (2.10)$$

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 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*:

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

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

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).

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

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:

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

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

Причем:

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

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

Таким образом:

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

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:

$$dA = Udq = IUdt \qquad (2.15)$$

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

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

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

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

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:

$$dQ = IUdt = I^2Rdt = U^2dt/R \qquad (2.18)$$

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

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 $\Rightarrow$ проводник с током воздействует на магнитную стрелку (см. рис. 27).

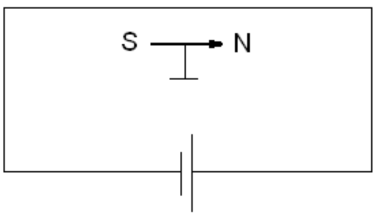


Рис. 27 – Магнитная стрелка вблизи проводника с током

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.

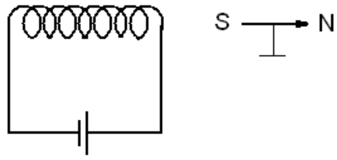


Рис. 28 – Магнитная стрелка вблизи катушки с током

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).

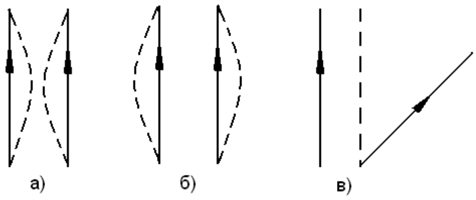


Рис. 29 – Взаимодействие токов

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.

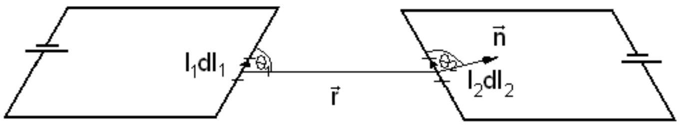


Рис. 30 – «Станок Ампера»

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

где $k = \frac{\mu_0}{4\pi}$, а $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная; I_1dl_1 и I_2dl_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*.

3.**Работа и мощность тока**.

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 $dF \sim Idl$.

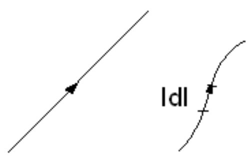


Рис. 31 – Проводник с током и пробный элемент тока

$$dF = BIdlsin\theta, \tag{3.2}$$

где θ – угол между направлением $\vec{B}$ и участком длины $\overrightarrow{dl}$; 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:

$$dB = \frac{dF_{max}}{Idl} \tag{3.3}$$

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.

4.Магнитное поле.

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 отличии 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.

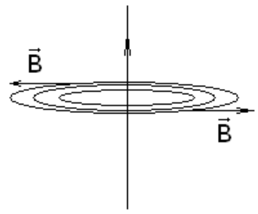


Рис. 32 – Магнитное поле прямого тока

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

$$B = \mu\mu_0 H, \tag{3.4}$$

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:

$$dF = IBd\ell \sin\theta, \tag{3.7}$$

где $\angle\theta = \left(d\hat{\ell}B\right)$

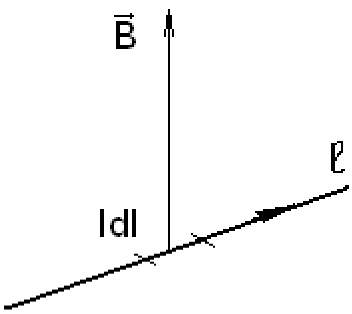


Рис. 34 – Проводник с током в магнитном поле

$$F = \int_{\ell} IBd\ell \sin\theta$$

Если поле однородное B=*const* и *I*=*const*:

$$F = IB\sin\theta \int_{\ell} d\ell = I\ell B\sin\theta$$

$$F_{\text{A}} = I\ell B \sin\theta \tag{3.8}$$

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

$$\overrightarrow{F_{\text{A}}} = I\left[\vec{\ell}\vec{B}\right] \tag{3.9}$$

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.

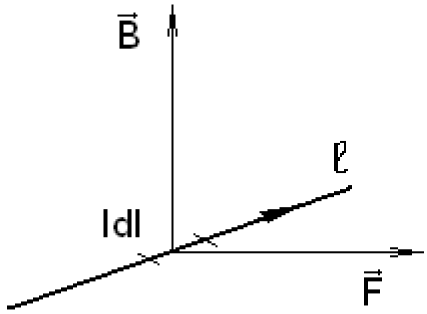


Рис. 35 – Действие силы *F* на проводник с током

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

Опыты:

а) Катушка, гальванометр, постоянный магнит.

б) Катушка №1, Катушка №2, гальванометр.

в) Катушка №1, Катушка №2 с ключом, гальванометр.

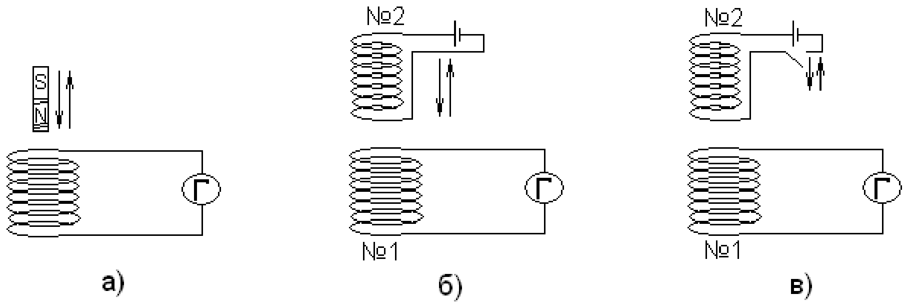


Рис. 42 – Опыты М. Фарадея

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.

5.Электромагнитная индукция.

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.

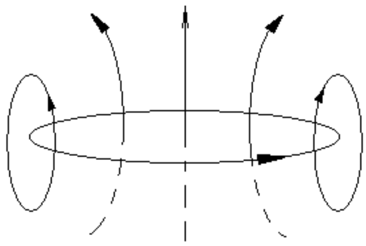


Рис. 43 – Замкнутый проводник в магнитное поле

Выводы:

1. Индукционный ток в проводнике возникает, когда проводник пересекают линии индукции магнитного поля;

2. 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:

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

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} \tag{3.15}$$

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

Величина электродвижущей силы индукции (ЭДС) ε 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).

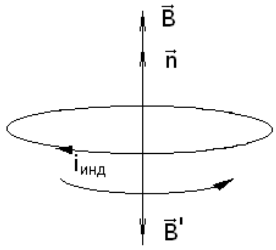


Рис. 44 – Применение правила Ленца

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

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).

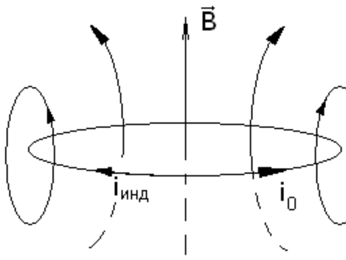


Рис. 45 – Замкнутый контур с переменным током i_0

В итоге, магнитный поток Φ, пронизывающий контур, также будет меняться во времени. Он порождает индукционный ток $i_{инд}$ 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.

6. Магнитные свойства вещества.

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).

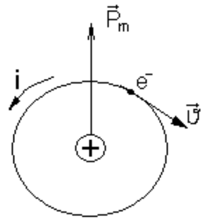
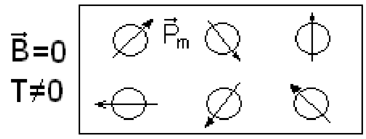


Рис. 48 – Молекулярный ток

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.

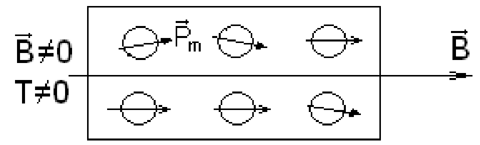
Вещество в магнитном поле

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 $=>$ 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 $P_{орб}$, дополнительный индуцированный момент $P_{инд}$, направленный против основного поля (ослабляет поля). Если просуммировать все орбитальные моменты, то может оказаться, что $\sum_0^n P_{орб} = 0$ или $\sum_0^n P_{орб} \neq 0$.

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 ($\sum_0^n P_{орб} \neq 0\,, \sum_0^n P_{орб} > \sum_0^n P_{инд}$). 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 никиля $T_{кр}$=630 К.

7.Электромагнитные волны.

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;

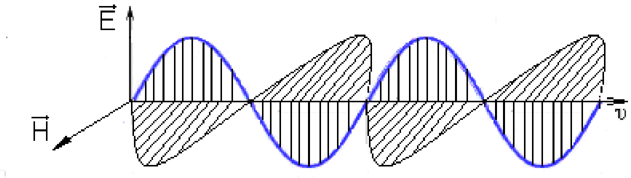


Рис. 49 – Электромагнитная волна

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

$$\vartheta = 1 \big/ \sqrt{\varepsilon_0\mu_0}\sqrt{\varepsilon\mu} \tag{3.26}$$

В вакууме:

$$\vartheta = 1 \big/ \sqrt{\varepsilon_0\mu_0} \tag{3.27}$$

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:

$$\vec{P} = [\vec{E}\vec{H}] \tag{3.28}$$

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

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

2.1 Лабораторная работа № 11.1 (2 часа).

Тема: «Определение момента инерции шатуна»

2.1.1 Цель работы: Определить момент инерции шатуна использовав 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 О. 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.

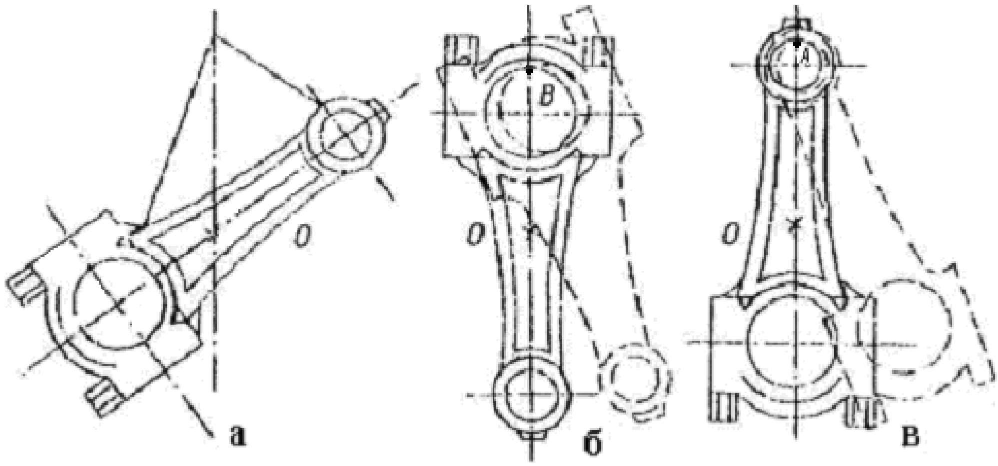


Рис. 1

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°) $\left(T_B = \frac{t}{10}\right)$.
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_O
Относительно оси, проходящей через точку В. Относительно оси, проходящей через точку А.								

8. Вычислить J_O 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_O относительно оси, проходящей через центр масс.

2.2 Лабораторная работа № 3.2 (2 часа).

Тема: «Последовательное и параллельное соединение проводников»

2.2.1 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.

2.2.2 Задачи работы:

1. Сборка электрической цепи
2. Расчет напряжений, сил токов, сопротивлений при последовательном и параллельном соединениях

2.2.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:
1) амперметр, 2) вольтметр, 3) набор сопротивлений, 4) соединительные провода, 5) источник тока (12В).

2.2.4 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.

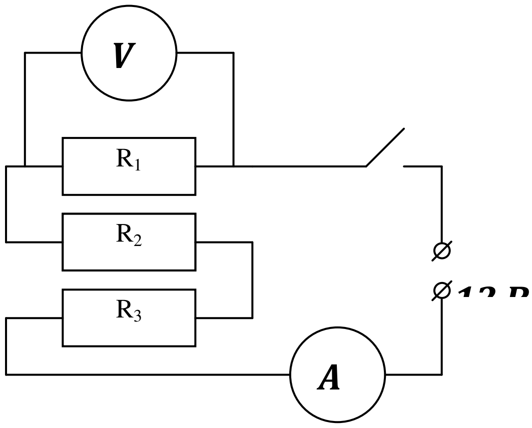


Рис.3

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).

<u>Примечание</u>: 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 последовательное	(В)	(А)	(Вт)	(Ом)
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.

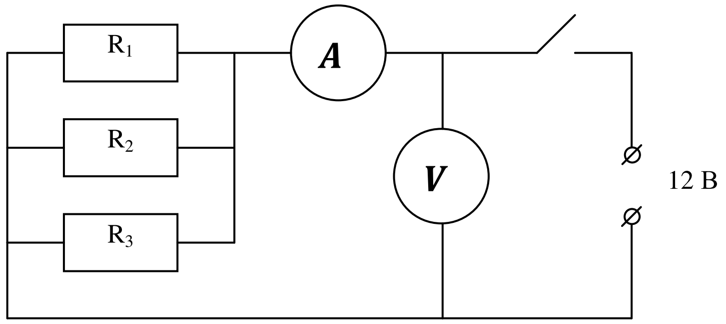


Рис.4

2. Измеряют ток в каждой ветви, включая амперметр в каждую ветвь как это показано на рис.5 (а и б)

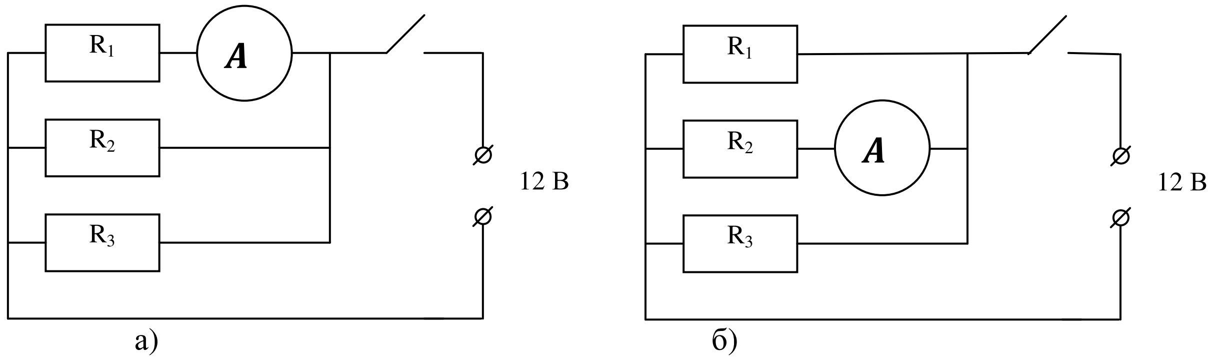


Рис.5

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 ($U_{об} = U_1 = U_2 = U_3$, $I_{об} = I_1 + I_2 + I_3$)

$R_{теор} = R_{эксп}$; $\dfrac{1}{R_{теор}} = \dfrac{1}{R_1} + \dfrac{1}{R_2} + \dfrac{1}{R_3}$

5. Составляют отчет по работе и делают выводы.

3. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ПРОВЕДЕНИЮ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

3.1 Практическое занятие №1 (2 часа).

Тема: «Квантовая природа света»

3.1.1 Задание для работы:

1. Внешний фотоэффект. Законы и квантовая теория внешнего фотоэффекта. Уравнение Эйнштейна. Применение фотоэффекта.
2. Эффект Комптона.
3. Корпускулярные и волновые свойства света. Фотон и его свойства: масса и импульс фотона, заряд, энергия, скорость, давление.

3.1.2 Краткое описание проводимого занятия:

Основные законы и формулы

Наименование	Формула
1	**2**
Закон преломления света	$\dfrac{\sin\varepsilon}{\sin\varepsilon'} = n_{21}$

Относительный показатель преломления	$n_{21} = \frac{n_2}{n_1}$
Абсолютный показатель преломления	$n = \frac{c}{\upsilon}$
Формула линзы	$\frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b}$
Оптическая сила линзы	$\Phi = \frac{1}{f}$
Оптическая сила двух совмещенных линз	$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2$
Линейное увеличение линзы	$\beta = \frac{b}{a} = \frac{y'}{y}$
Увеличение лупы	$\beta = \frac{L}{f}$
Увеличение микроскопа	$\beta = \frac{lL}{f_{ок} f_{об}}$
Освещенность	$E = \frac{\Phi}{S}$
Освещенность, создаваемая точечным источником света	$E = \frac{I \cos \alpha}{r^2}$
Формула дифракционной решетки	$d \sin \varphi = k\lambda$
Постоянная дифракционной решетки	$d = a + b = \frac{1}{N}$
Закон Брюстера	$tg \alpha_B = n_{21}$
Закон Стефана ─ Больцмана	$R_0 = \sigma T^4$
Закон Вина	$\lambda_m \frac{C'}{T}$
Энергия кванта (закон Планка)	$\varepsilon = h\nu = h\frac{c}{\lambda}$
Формула Эйнштейна для фотоэффекта	$\varepsilon = A + \frac{m\upsilon^2}{2}$
Красная граница (порог) фотоэффекта	$\nu_{гр} = \frac{A}{h}$; $\lambda_{гр} = \frac{hc}{A}$
Закон взаимосвязи массы и энергии	$E = mc^2$

Энергетическая освещенность, облученность	$E_e = \dfrac{E}{St}$
Давление света	$p = \dfrac{E}{cSt}(1+\rho)$

Пример 1. *На каком расстоянии друг от друга необходимо подвесить лампы в теплицах, чтобы освещенность Е на поверхности Земли в точке, лежащей посередине между двумя лампами, была не менее 200 лк? Высота теплицы h = 2 м. Сила света каждой лампы I = 800 кд (рис.9).*

Решение. Расстояние l между лампами можно определить из формулы прямоугольного треугольника:

$$l = 2a = 2\sqrt{r^2 - h^2} \qquad (1)$$

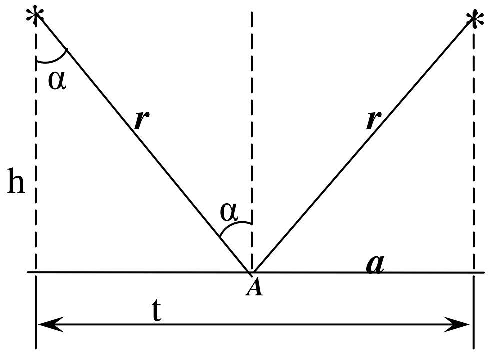


Рис. 9

Лампу можно принять за точечный источник света, так как ее размеры малы по сравнению с расстоянием до точки, в которой определяется освещенность, Поэтому найти расстояние r от лампы до точки А можно из формулы освещенности:

$$E = \frac{I}{r^2}\cos\alpha\,, \qquad (2)$$

где α – угол, под которым подают лучи.

Подставив в (2) $\cos\alpha = \dfrac{h}{r}$, выразим r:

$$r = \sqrt[3]{\frac{Ih}{E}}\,. \qquad (3)$$

Подставим выражение (3) в (1):

$$l = 2\sqrt{\left(\sqrt[3]{\frac{Ih}{E}}\right)^2 - h^2}\,. \qquad (4)$$

Подставим числовые значения величин в (4) и вычислим:

$$l = 2\sqrt{\left(\sqrt[3]{\frac{800 \cdot 2}{100}}\right)^2 - 2^2}\, м = 2\sqrt{\left(\sqrt[3]{16}\right)^2 - 4}\, м = 2{,}32\, м\ .$$

Ответ: *l = 2,32 м.*

Пример 2. *Фокусное расстояние объектива микроскопа f_1 = 5 мм, окуляра f_2 = 25 мм. Предмет находится на расстоянии s = 5,1 мм от объектива (рис. 10). Вычислить длину тубуса микроскопа и даваемое микроскопом увеличение β.*

Решение. Увеличение микроскопа:

$$\beta = \beta_1 \beta_2\ , \tag{1}$$

где β_1 – увеличение объектива; β_2 – увеличение окуляра, определяемые по формулам:

$$\beta_1 = \frac{s'}{f_1}\ , \tag{2}$$

$$\beta_2 = \frac{0{,}25}{f_2}\ , \tag{3}$$

где s' – расстояние от объектива до даваемого им действительного изображения; 0,25 м – расстояние наилучшего видения для нормального глаза.

С учетом (2) и (3) формула (1) примет вид:

$$\beta = \frac{0{,}25 s'}{f_1 f_2} \tag{4}$$

Расстояние s' от объектива до изображения можно найти из формулы линзы:

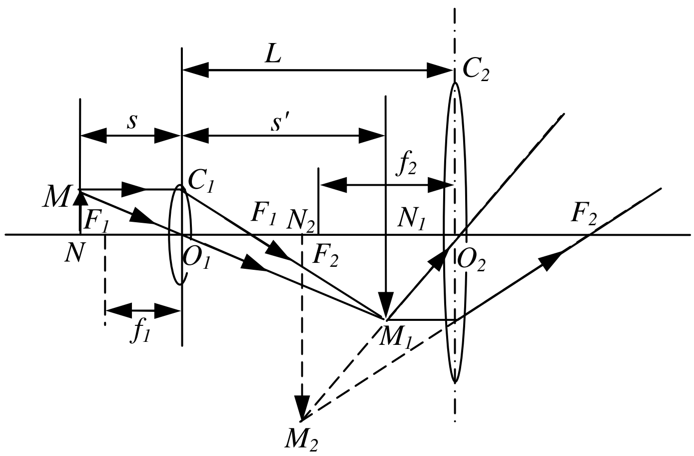


Рис. 10

$$\frac{1}{f_1} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'}$$

где (s – расстояние от предмета до линзы), откуда:

$$s' = \frac{f_1 s}{s - f_1}\ .$$

Подставив выражение для s' в (4), получим:

$$\beta = \frac{0{,}25s}{f_2\left(s - f_1\right)} \tag{5}$$

Выпишем величины, входящие в формулу (5), в СИ:

$$s = 5{,}1 \cdot 10^{-3}\ м,\ f_1 = 5 \cdot 10^{-3}\ м,\ f_2 = 25 \cdot 10^{-3}\ м.$$

Длину тубуса определим, исходя из следующих соображений. Действительное изображение, даваемое объективом, должно лежать в фокусе окуляра, так как окуляр действует как лупа (рис. 10). Поэтому длина тубуса:

$$L = s' + f_2 = \frac{f_1 s}{s - f_2} + f_2 . \tag{6}$$

Подставим числовые значения величин в (5) и (6) и вычислим:

$$\beta = \frac{0{,}25 \cdot 5{,}1 \cdot 10^{-3}}{25 \cdot 10^{-3}\left(5{,}1 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-3}\right)} = 510 ,$$

$$L = \frac{5 \cdot 10^{-3} \cdot 5{,}1 \cdot 10^{-3}}{5{,}1 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-3}}\ м + 25 \cdot 10^{-3}\ м = 0{,}25 м .$$

Ответ: $\beta = 510$, $L = 0{,}25$ *м*.

3.1.3 Результаты и выводы:

При подготовке к вопросам акцентировать внимание необходимо на физическом смысле математических выражений, с помощью которых описывается явление и на более сложных из них для лучшего запоминания. Необходимо обратить внимание на графический метод описания и исследования оптических явлений и процессов.

3.2 Практическое занятие №2 (2 часа).

Тема: «Атомная и ядерная физика»

3.2.1 Задание для работы:

1. Строение атомного ядра. Размер, состав и заряд атомного ядра. Массовое и зарядовое числа.
2. Дефект массы и энергия связи ядра. Удельная энергия связи. Магические ядра. Спин ядра и его магнитный момент.
3. Ядерные силы. Модели ядра.
4. Радиоактивное излучение и его виды. Закон радиоактивного распада. Правила смещения.
5. Ядерные реакции и их основные типы.
6. Реакция синтеза атомных ядер. Термоядерный синтез.
7. Методы наблюдения и регистрации радиоактивных излучений и частиц.

3.2.2 Краткое описание проводимого занятия:

Основные законы и формулы

Наименование	Формула
1	**2**

Сериальная формула для атома водорода	$\nu = \frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2}\right)$
Период полураспада	$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0{,}693}{\lambda}$
Активность радиоактивного изотопа	$a = \lambda N = N\frac{0{,}693}{T_{1/2}}$
Дефект массы ядра	$\Delta m = Zm_P + (A - Z)m_П - m_Я$ $\Delta m = Zm_{{}^1_1H} + (A - Z)m_П - m_A$
Энергия связи ядра	$E_{СВ} = \Delta mc^2$, $E_{СВ} = 931\Delta m$
Удельная энергия связи	$\varepsilon = \frac{E_{СВ}}{A}$

Пример 1. *Определить энергию фотона, излучаемого атомом водорода при переходе электрона с третьего энергетического уровня на первый, а также длину электромагнитной волны, соответствующую этому фотону.*

Решение. Переход электрона в атоме водорода с отдаленной орбиты на внутреннюю связан с излучением фотона (кванта энергии):

$$\varepsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda}, \tag{1}$$

где ε – энергия фотона; h – постоянная Планка; c – скорость света в вакууме; ν, λ – частота и длина волны, соответствующие фотону с энергией ε.

Длина волны излучаемого света связана с номером орбит соотношением:

$$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2}\right), \tag{2}$$

где R – постоянная Ридберга; n – номер энергетического уровня, на который переходит электрон; k – номер энергетического уровня, с которого уходит электрон.

Подставим в (2) $R = 1{,}1 \cdot 10^7$ $м^{-1}$, $n=1$, $k = 3$ и вычислим длину волны λ:

$$\frac{1}{\lambda} = 1{,}10 \cdot 10^7\left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{3^2}\right)м^{-1} = 9{,}77 \cdot 10^6\ м^{-1},$$

$$\lambda = \frac{1}{9{,}77 \cdot 10^6}\ м = 1{,}02 \cdot 10^{-7}\ м = 102 нм.$$

В выражение (1) подставим числовые значения величин c, λ и вычислим:

$$\varepsilon = \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{1{,}02 \cdot 10^{-7}}\ Дж = 1{,}95 \cdot 10^{-18}\ Дж = \frac{1{,}95 \cdot 10^{-18}}{1{,}60 \cdot 10^{-19}}\ эВ = 12{,}2 эВ.$$

Ответ: $\varepsilon = 12{,}2$ *эВ*.

Пример 2. *Определить наименьшую длину волны рентгеновского излучения, создаваемого трубкой, работающей под напряжением 500 кВ. Какой минимальной скоростью должны обладать электроны в этой трубке?*

Решение. Энергия кванта рентгеновского излучения при бомбардировке антикатода трубки электронами, разогнанными в электрическом поле, должна равняться энергии электрона, получаемой им в электрическом поле:

$$h\nu = eU \text{, но } \nu = \frac{c}{\lambda} \text{ следовательно } \frac{hc}{\lambda} = eU$$

Отсюда

$$\lambda = \frac{hc}{eU}, \qquad (1)$$

Скорость электрона можно определить из условия равенства кинетической энергии и энергии, приобретённой им в электрическом поле:

$$\frac{m\upsilon^2}{2} = eU \Rightarrow \upsilon = \sqrt{\frac{2eU}{m}}. \qquad (2)$$

Выразим в СИ числовое значение напряжения U: $U = 5 \cdot 10^5\ В$.

Подставляем в полученные формулы (1) и (2) числовые значения заданных величин (заряд и массу электрона находим из таблицы):

$$\lambda = \frac{6.63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot 5 \cdot 10^5} = 2{,}48 \cdot 10^{-12}\ м,$$

$$\nu = \frac{2 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot 5 \cdot 10^5}{9{,}1 \cdot 10^{-31}} = 4{,}2 \cdot 10^8\ м/с.$$

Ответ: $\lambda = 2{,}48 \cdot 10^{-12}\ м$, $\nu = 4{,}2 \cdot 10^8\ м/с$

3.2.3 Результаты и выводы:

При подготовке к вопросам акцентировать внимание необходимо на физическом смысле математических выражений, с помощью которых описывается явление и на более сложных из них для лучшего запоминания. Необходимо обратить внимание на графический метод описания и исследования оптических явлений и процессов.