

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

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ
ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ**

Б1.Б.06 БИОЛОГИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Специальность 36.05.01 Ветеринария

Специализация Ветеринарное дело

Форма обучения очная

СОДЕРЖАНИЕ

1. Конспект лекций.....	3
1.1 Лекция № 1 Кинематика и динамика материальной точки.....	5
1.2 Лекция № 2 Вращательное движение твердого тела. Механические колебания.....	7
1.3 Лекция № 3 Физические основы гемодинамики. Механика сердечно-сосудистой системы. Физические основы акустики. Биофизика инфразвука. Биофизика ультразвука.....	10
1.4 Лекция № 4 Основы молекулярно-кинетической теории. Реальные газы.....	14
1.5 Лекция № 5 Физические основы термодинамики.....	17
1.6 Лекция № 6 Основы термодинамики биологических процессов	20
1.7 Лекция № 7 Электростатика. Емкость. Законы постоянного тока.....	23
1.8 Лекция № 8 Электрические явления в биологических системах.....	25
1.9 Лекция № 9 Магнитное поле тока в вакууме и в веществе. Электромагнитная индукция. Электромагнитные колебания и волны.....	27
1.10 Лекция № 10 Волновая оптика	33
1.11 Лекция № 11 Тепловое излучение. Квантовый механизм излучения света. Строение атома. Физика атомного ядра.....	35
2. Методические указания по выполнению лабораторных работ.....	39
2.1 Лабораторная работа № 11.1 ЛР-11.1 Определение момента инерции шатуна и диска.....	41
2.2 Лабораторная работа № 20-1 ЛР-20-1 Изучение затухающих колебаний.....	43
2.3 Лабораторная работа № 15.1 ЛР-15.1 Изучение закона сохранения и превращения механической энергии при движении тела по наклонной поверхности	44
2.4 Лабораторная работа № 19.1 ЛР-19.1 Определение ускорения свободного падения тел с помощью математического маятника	45
2.5 Лабораторная работа № 21.1 ЛР-21.1 Изучение закона свободных колебаний упруго деформированного тела.....	46
2.6 Лабораторная работа № 7.2 ЛР-7.2 Определение коэффициента вязкости жидкости методом Стокса.....	47

2.7 Лабораторная работа № 2.4 ЛР-2.4 Явления переноса.....	54
2.8 Лабораторная работа № 2.5 ЛР-2.5 Цикл Карно.....	63
2.9 Лабораторная работа № 2.7 ЛР-2.6 Энтропия.....	71
2.10 Лабораторная работа № 3.2 ЛР-5.3 Последовательное и параллельное соединение проводников.....	79
2.11 Лабораторная работа № 3.1 ЛР-3.1 Движение заряженной частицы в электрическом поле.....	88
2.12 Лабораторная работа № 3.4 ЛР-3.4 Движение заряженной частицы в магнитном поле.....	91
2.13 Лабораторная работа № 4.2 ЛР-4.2 Интерференция, поляризация света.....	96
2.14 Лабораторная работа № 4.4 ЛР-4.4 Законы внешнего фотоэффекта.....	102

1. КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

1.1 Лекция №1 (2 часа).

Тема: «Кинематика и динамика материальной точки»

1.1.1 Вопросы лекции:

1. Механическое движение. Система отсчета. Векторы перемещения, скорости и ускорения. Нормальное, тангенциальное и полное ускорения при криволинейном движении.
2. Законы Ньютона в инерциальных системах отсчета. Закон сохранения импульса.
3. Работа переменной силы. Вычисление работы упругой силы. Кинетическая и потенциальная энергии. Мощность и к.п.д. двигательного аппарата животных. Закон сохранения энергии в механике.

1.1.2 Краткое содержание вопросов:

1. Механическое движение. Система отсчета. Векторы перемещения, скорости и ускорения. Нормальное, тангенциальное и полное ускорения при криволинейном движении.

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

Разделы механики:

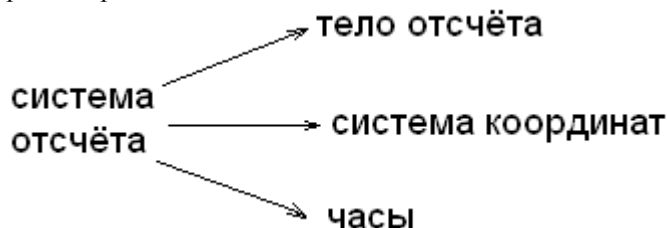
кинематика – изучает движение тел вне связи с причинами, которые изменяют это движение;

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).

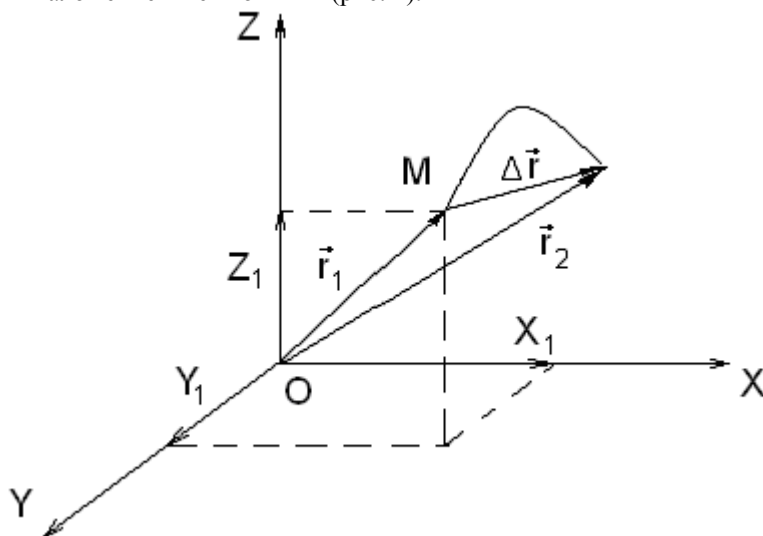


Рис. 1 – Координаты точки в декартовой системе координат

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

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:

$$x = x(t)$$

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

$$z = z(t)$$

В векторной форме уравнения движения можно записывать в виде:

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

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

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

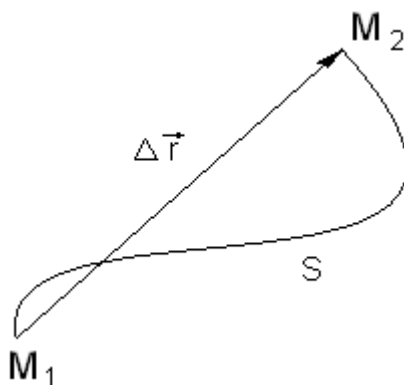


Рис. 2 – Траектория M_1M_2 , путь S , вектор перемещения $\Delta\vec{r}$

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

1.1.2 Скорость материальной точки

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

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

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

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

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

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

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

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

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

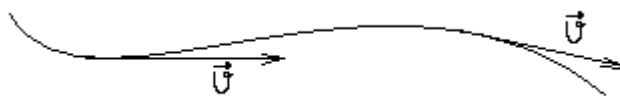


Рис. 3 – Направление вектора скорости

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

1.1.3 Ускорение материальной точки

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

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

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

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

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

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

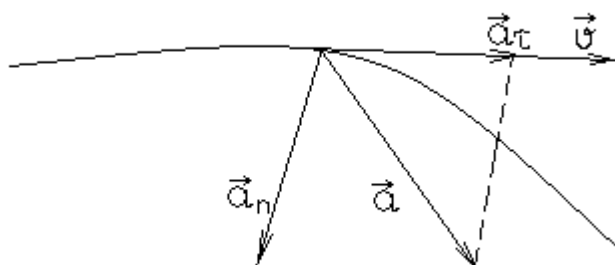


Рис. 4 – Полное ускорение и его составляющие

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

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

где a_y – центростремительное ускорение.

a_τ – характеризует изменение скорости по величине:

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

a – полное ускорение, которое определяется по формуле:

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

В скалярной форме:

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

Ускорение в СИ измеряется в м/с².

1.1.4 Классификация видов движения

В зависимости от a_τ и a_n движение можно классифицировать:

1) $a_n = 0, a_\tau = 0 \Rightarrow$ прямолинейное равномерное движение;

2) $a_\tau = \text{const}, a_n = 0 \Rightarrow$ прямолинейное равнопеременное движение;

3) $a_\tau = 0, a_n = \text{const} \Rightarrow$ равномерное движение по окружности;

4) $a_\tau \neq 0, a_n \neq 0 \Rightarrow$ криволинейное движение с изменяющейся скоростью.

В случае равнопеременного движения: если $a > 0$, то движение равноускоренное; если $a < 0$ – равнозамедленное. В таком случае $v = v_0 \pm at$; $s = v_0 t \pm \frac{at^2}{2}$.

Кинематика вращательного движения

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

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

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

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

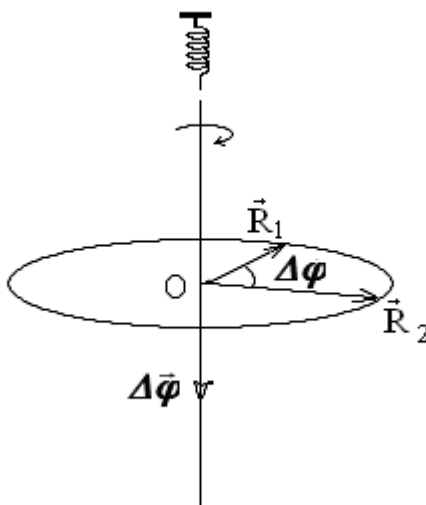


Рис. 5 – Вращение точки по окружности

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).

1.1.5 Угловая скорость

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

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

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

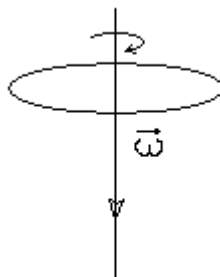


Рис. 6 – Направление угловой скорости

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

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

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

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

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

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

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

1.1.6 Угловое ускорение

Угловое ускорение – первая производная угловой скорости по времени:

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

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

- 1) при ускоренном движении $\vec{\beta} \uparrow \uparrow \vec{\omega}$;
- 2) при замедленном движении $\vec{\beta} \uparrow \downarrow \vec{\omega}$.

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

1.1.7 Связь между линейными и угловыми характеристиками при вращательном движении

$$1) \ S = r\varphi$$

$$2) \ v = r\omega$$

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

$$4) \ a_n = \omega^2 r$$

Таблица 1 – Аналогия формул для поступательного и вращательного движения.

поступательное движение	вращательное движение
-------------------------	-----------------------

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

2. Законы Ньютона в инерциальных системах отсчета. Закон сохранения импульса.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

В СИ сила измеряется в Ньютонах (Н).

Известны четыре основных (фундаментальных) типа взаимодействия:

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

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

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

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

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

где $k = 9 \cdot 10^9 \text{ м} / \Phi$ – 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).

И 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:

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

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

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

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

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

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

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

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

1.2.2 Импульс тела. Закон сохранения импульса в изолированной системе

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

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

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

Поскольку:

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

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

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

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:

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

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

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

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

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

3. Работа переменной силы. Вычисление работы упругой силы. Кинетическая и потенциальная энергии.

Мощность и к.п.д. двигательного аппарата животных. Закон сохранения энергии в механике.

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

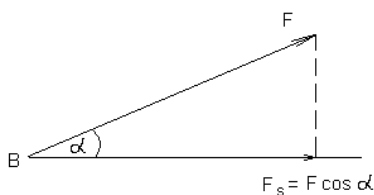


Рис. 7

F_s – движущая сила, составляющая силы F .

Для характеристики перемещающего действия силы вводится понятие *работы*.

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

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

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

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

В СИ единицей измерения работы является Джоуль (Дж).

5.2. Работа переменной силы

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

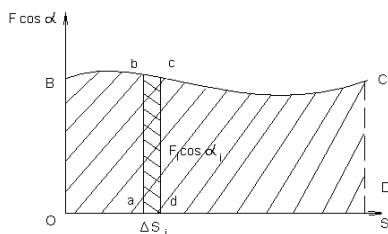


Рис. 8

Полная работа на всем пути:

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

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

$$A = \int_0^{OD} F dS \cos \alpha \quad (5.3)$$

5.3. Мощность

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

Мощность – физическая величина, характеризующая степень интенсивности выполнения работы.

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

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

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

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

В СИ единицей измерения мощности является ватт (Вт).

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

6.1. Энергия

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

. Кинетическая энергия

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

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

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

6.3. Потенциальная энергия.

6.3.1. Потенциальная энергия сжатой пружины.

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

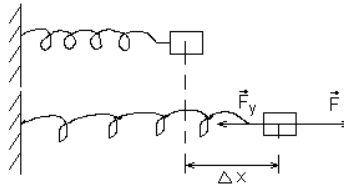


Рис. 9

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

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

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

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

6.3.2. Потенциальная энергия гравитационного взаимодействия

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

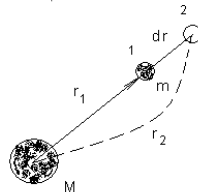


Рис. 10

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

Лекция №2 (2 час)

Тема: Вращательное движение твердого тела. Механические колебания.

1.2.1 Вопросы лекции:

1. Вращение твердого тела относительно неподвижной оси. Угловая скорость и угловое ускорение. Связь их с линейными скоростями и ускорениями в векторном виде.
2. Основное уравнение динамики вращательного движения твердого тела. Момент инерции. Моменты инерции некоторых тел правильной геометрической формы.
3. Моменты инерции конечностей в локомоторном аппарате животных. Момент импульса. Закон сохранения момента импульса.
4. Колебательные движения в биологических объектах (колебание сердечной мышцы, крыльев птиц, колебательные процессы в клетке и пр.).
5. Линейный гармонический осциллятор. Уравнение и графики смещения, скорости и ускорения при гармонических колебаниях. Пружинный маятник. Энергия гармонического осциллятора. Действие вибраций на организм животных и на их продуктивность.
6. Затухающие и вынужденные колебания. Резонанс и резонансные кривые. Резонансные явления в биологических системах.

1.2.2 Краткое содержание вопросов

1. Вращение твердого тела относительно неподвижной оси. Угловая скорость и угловое ускорение. Связь их с линейными скоростями и ускорениями в векторном виде.

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

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

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

8.2. Момент силы

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

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

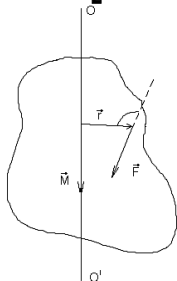


Рис. 11

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

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

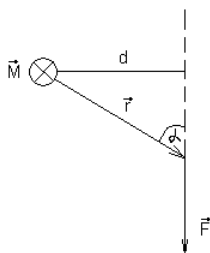


Рис. 12

Таким образом:

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

d – *плечо силы*, есть кратчайшее расстояние от оси вращения до линии действия силы. Чтобы найти плечо силы необходимо опустить перпендикуляр от оси вращения на линию действия силы. В СИ единицей измерения момента силы является $\text{Н} \cdot \text{м}$.

8.3. Основное уравнение динамики вращательного движения

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

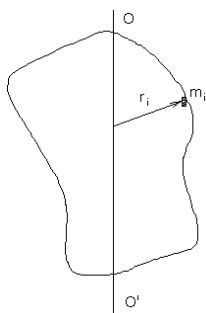


Рис. 13

2. Основное уравнение динамики вращательного движения твердого тела. Момент инерции. Моменты инерции некоторых тел правильной геометрической формы.

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

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

Чтобы перейти к твёрдому телу необходимо такие уравнения записать для всех точек, составляющих это тело и просуммировать все уравнения $\sum_{i=1}^n \vec{M}_i = \sum_{i=1}^n I_i \cdot \beta$ величина, $\sum_{i=1}^n M_i = M_{рез}$ – результирующий момент сил. I – момент инерции твёрдого тела равен сумме моментов инерций всех материальных точек тела:

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

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

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

Уравнение (8.3) называется *основным уравнением динамики вращательного движения*. Во вращательном движении $\beta = \frac{M}{I}$ – второй закон Ньютона для вращающегося твёрдого тела. Роль силы играет момент сил. Мерой инертности твердого тела вращательного движения является момент инерции.

3. Моменты инерции конечностей в локомоторном аппарате животных. Момент импульса. Закон сохранения момента импульса.

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

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

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

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

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

Пример 2. Момент инерции диска.

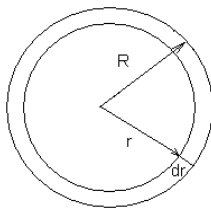


Рис. 15

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

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

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

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

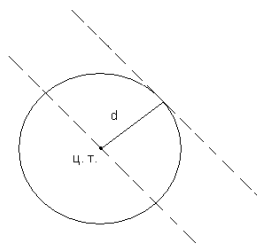


Рис. 16

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

Если тело неправильной геометрической формы, то момент инерции можно найти косвенным путём: используя закон сохранения энергии; период колебания физического маятника $T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{mgr}}$ и

т.д..

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

9.1. Момент импульса. Закон сохранения момента импульса.

Уравнение динамики вращательного движения можно записать в другом виде

$\vec{M} = I \cdot \vec{\beta} = I \frac{d\vec{\omega}}{dt} \Rightarrow \vec{M} = \frac{d(I\vec{\omega})}{dt}$. 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 $\sum_{i=1}^n M_i = 0 \Rightarrow$

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

Уравнение (9.1) есть закон сохранения момента импульса.

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

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

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

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

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

9.3. Кинетическая энергия катящегося тела

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

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

Данное положение учитывают при решении многих практических задач.

9.4. Аналогия формул поступательного и вращательного движения

поступательное движение	вращательное движение
S, \vec{v}, \vec{a}	$\varphi, \vec{\omega}, \vec{\beta}$

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

4. Колебательные движения в биологических объектах (колебание сердечной мышцы, крыльев птиц, колебательные процессы в клетке и пр.).

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

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

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

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

10.1. *Гармоническое колебательное движение и его характеристики.*

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

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

где x – смещение колеблющейся точки;

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

ω – круговая (циклическая) частота;

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

T – период колебаний (время одного полного колебания);

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

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

Подставляя (10.3) в (10.2) получим:

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

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

$(\omega t + \varphi_0)$ – 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:

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

Ускорение колеблющейся частицы первая производная скорости по времени:

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

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

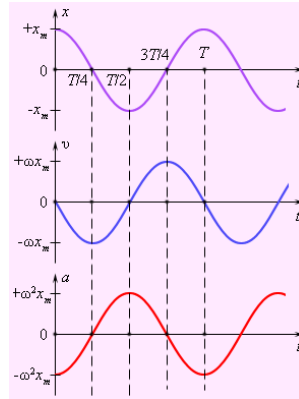


Рис. 17

10.2. Динамика колеблющейся точки

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

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

5. Линейный гармонический осциллятор. Уравнение и графики смещения, скорости и ускорения при гармонических колебаниях. Пружинный маятник. Энергия гармонического осциллятора. Действие вибраций на организм животных и на их продуктивность.

М а я т н и к и

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

$$\begin{aligned} k = m\omega^2 &\Rightarrow \omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \\ \omega = \frac{2\pi}{T} &\Rightarrow T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \\ T &= 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \end{aligned} \quad (10.7)$$

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

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

$$\begin{aligned} mg \sin \alpha &= F_{\epsilon} \\ mg \sin \alpha &= -kx = F_{\epsilon} \\ \frac{mgx}{l} &= -kx \Rightarrow k = \frac{mg}{l} \end{aligned}$$

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

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

Формула (10.8) – период колебаний математического маятника.

Из формулы (10.8) следует, что:

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

Следует отметить, что плоскость колебания маятника в пространстве сохраняется.

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

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

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 $E_k = \frac{mv^2}{2}$ и потенциальной $E_k = \frac{kx^2}{2}$, т.е. $E_n = \frac{mv^2}{2} + \frac{kx^2}{2}$.

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

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

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

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

6. Затухающие и вынужденные колебания. Резонанс и резонансные кривые. Резонансные явления в биологических системах.

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

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

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

(11.1) дифференциальное уравнение свободных колебаний.

Необходимые условия для возникновения свободных колебаний:

- 1) Наличие энергии, избыточной по сравнению с энергией системы, в положении устойчивого равновесия;
 - 2) Работа сил трения в системе должна быть значительно меньше избыточной энергии.
- В отсутствии этих условий колебания быстро затухают или не возникают вообще.

11.2. Затухающие колебания

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

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

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

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

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

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

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

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

(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:

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

Коэффициент затухания зависит от массы и сопротивления среды:

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

11.3. Вынужденные колебания. Резонанс.

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

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

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

Проводя соответствующие преобразования, получаем решение данного уравнения:

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

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

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

Если в системе существует силы трения то:

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

И тогда:

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

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:

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

Лекция №3 (2 часа)

Тема: Физические основы гемодинамики. Механика сердечно-сосудистой системы. Физические основы акустики. Биофизика инфразвука.

1.3.1 Вопросы лекции:

1. Гидродинамика идеальной жидкости. Стационарный поток. Уравнение неразрывности потока. Уравнение Бернулли и следствия из него.

2. Гидродинамика вязкой жидкости. Формула Ньютона. Коэффициент вязкости и методы его измерения на основе законов Стокса и Пуазейля.

3. Физические свойства крови. Кровь, как неньютоновская жидкость. Вычисление работы сердца. Физическая модель сосудистой системы. Перераспределение энергии в эластичных стенках кровеносных сосудов и значение этого явления для кровообращения. Пульсовая волна.

4. Гидростатическое давление крови. Физические основы методов измерения артериального давления.

5. Волны в упругих средах. Уравнение волны. Перенос энергии волной. Интенсивность волны.

Природа звука. Источники звука, высота, тембр и интенсивность. Звуковое давление. Спектральный состав звука. Акустические методы в ветеринарной клинике (перкуссия, аускультация).

6. Психофизический закон Вебера-Фехнера. Уровень интенсивности звука. Бел и децибел.

Громкость звука и единицы ее измерения. Пороги звукового ощущения у человека и некоторых животных. Шумомеры. Шум, как стресс-фактор, его влияние на живой организм и на продуктивность сельскохозяйственных животных. Борьба с шумом при интенсивном ведении животноводства и птицеводства. Физические основы звукоизлучательного и слухового аппаратов у животных.

7. Инфразвук и его свойства. Действие инфразвука на животных (разрыв кровеносных сосудов при большой интенсивности, изменение частоты альфа-ритма мозга, действие на вестибулярный аппарат и пр.). Источники инфразвука в природе и при промышленном ведении животноводства.

8. Ультразвук, методы его получения и регистрации (пьезоэлектрический и магнитострикционный). Физические свойства ультразвука. Взаимодействие ультразвука с веществом. Отражение звуковой волны на границе раздела двух сред. Понятие об акустическом сопротивлении среды. Ультразвук в мире животных. Использование ультразвука в ветеринарной хирургии, терапии и диагностике. Понятие о диагностике, основанной на эффекте Доплера.

1.3.2 Краткое содержание вопросов

1. Гидродинамика идеальной жидкости. Стационарный поток. Уравнение неразрывности потока. Уравнение Бернулли и следствия из него.

Элементы механики жидкостей

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

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

Говоря о реальной жидкости можно сказать, что:

1) Реальная жидкость сжимаема: её объём уменьшается, а плотность увеличивается с повышением давления. Все жидкости в той или иной степени сжимаемы, но их сжимаемость незначительна.

НАПРИМЕР: при повышении давления от 10^5 до 10^7 Па (1-100 атм) плотность воды увеличивается всего лишь на 0,5 %. Конечно, при движении жидкостей по трубам или в открытых руслах, таких больших перепадов обычно не возникает. Поэтому при рассмотрении многих законов гидродинамики сжимаемостью жидкостей можно пренебречь

2) Реальная жидкость вязкая: при движении жидкости между отдельными частицами всегда возникают силы внутреннего трения, или силы вязкости. Однако, если силы внутреннего трения малы по сравнению с другими действующими в ней силами (внешнего давления, силы тяжести и т.п.), то ими можно пренебречь и считать жидкость невязкой.

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

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

13.2. Основные понятия механики жидкостей

Поток – совокупность движущихся частиц жидкости. В связи с тем, что в жидкости движется огромное количество частиц, исследование каждой отдельной частицы практически неосуществимо. В гидродинамике используется метод исследования потока предложенный Л. Эйлером. В 1773 году Эйлер получает дифференциальные уравнения движения невязкой жидкости, в основу которых заложен

совершенно новый метод исследования теоретической механики, ориентированный на решение задач динамики не твердого тела, а жидкости.

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

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

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

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

13.3. Уравнение неразрывности струи

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

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

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

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

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

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

14.1. Уравнение Бернулли и его применение

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

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

где P_0 – атмосферное давление

ρgh – давление столба жидкости.

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

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

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

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

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

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

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

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

Величину P называют статическим давлением;

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

Величину ρgh - гидростатическим давлением.

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

14.2. Давление жидкости, текущей по трубе переменного сечения.

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

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

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

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

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

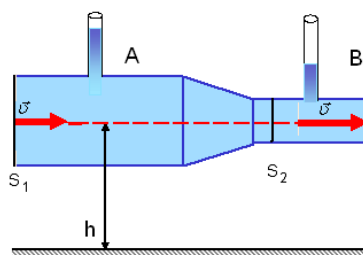


Рис. 25

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

$$P_{дин} = P - P_{ст} \quad (14.4)$$

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

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.

2. Гидродинамика вязкой жидкости. Формула Ньютона. Коэффициент вязкости и методы его измерения на основе законов Стокса и Пуазейля.

4) Закупорка артерии.

Образование атеросклеротической бляшки в артерии диаметром d_1 вызывает сужение просвета артерии до диаметра d_2 (рис.4).

Пусть артерия расположена горизонтально.

Течение крови по артерии будет происходить до того момента, пока статическое давление P_2 в месте образования атеросклеротической бляшки будет превышать наружное давление на сосуд P_0 (его можно считать приблизительно равным атмосферному). То есть, кровоток возможен при условии:

$$P_2 - P_0 \geq 0. \quad (8)$$

Это реализуется, если $d_2 \geq d_{min}$.

Запишем уравнение Бернулли и условие неразрывности струи для нашего случая:

Для сонной артерии: средний диаметр $d_1 = 1$ см,
(нормальные условия) скорость крови $v_1 = 0,2$ м/с,
 плотность крови $\rho = 1,05 \cdot 10^3$ кг/м³,
 разница давлений $P_1 - P_0 = 100$ мм.рт.ст. = $1,33 \cdot 10^4$ Па

Вычисленный по формуле 10 минимальный диаметр сонной артерии равен $d_{min} \approx 2$ мм.

Если диаметр сужения станет меньше d_{min} , тогда под действием внешнего давления P_0 просвет сосуда в месте расположения атеросклеротической бляшки закроется и кровоток полностью остановится. Однако, в организме как в любой сложной системе существуют компенсационные механизмы. При сужении артерии сердце начинает работать в более напряженном режиме, в результате чего давление P_1 в артерии начнет возрастать, и кровь с усилием протекает через сужение. С помощью фонендоскопа можно услышать прерывистый шум во время работы сердца, свидетельствующий о нарушении нормального кровотока.

Внутреннее трение (вязкость) жидкости. Формула Ньютона.

При течении реальной жидкости между слоями, перемещающимися с различной скоростью, возникают силы внутреннего трения (вязкости). Эти силы, касательные к слоям, направлены так, что ускоряют медленно движущиеся слои и замедляют быстро движущиеся.

Слой, “прилипший” ко дну неподвижен. По мере удаления от дна скорость жидкости увеличивается. Максимальная скорость жидкости будет у слоя, который граничит с воздухом. Сила внутреннего трения пропорциональна площади взаимодействующих слоев S и тем больше, чем больше их относительная скорость. Так как разделение на слои условно, то принято выражать силу в зависимости от изменения скорости, приходящегося на единицу длины в направлении, перпендикулярном скорости, то есть от величины, называемой градиентом скорости ($grad V$):

$$F_{тр} = \dots \quad (11)$$

- это уравнение Ньютона.

Здесь η - коэффициент пропорциональности, называемый *коэффициентом внутреннего трения*, или *динамической вязкостью*. Вязкость зависит от химического состава, примесей и температуры. С повышением температуры вязкость жидкости уменьшается по закону:

$$\dots \quad (12)$$

где коэффициент A постоянен для каждой жидкости.

Единицей измерения η в “СИ” является $H \cdot сек / м^2$, $= Па \cdot с$, $1 Па \cdot с = 10 П = 10^3 сП$; в СГС - $дин \cdot сек / см^2$, эта единица называется пуазом. $1 пз = 0,1 м \cdot сек / м^2$.

где η - вязкость исследуемой жидкости, η_0 - вязкость стандартной жидкости.

Величина, обратная коэффициенту вязкости, называется *текучестью*.

Для растворов вязкость увеличивается с повышением концентрации растворенного вещества. При изучении свойств растворов иногда вводят характеристическую вязкость.

где c – концентрация растворенного вещества, $\eta_{отн}$ – относительная вязкость раствора по отношению к вязкости растворителя.

Характеристическая вязкость не зависит от концентрации растворенного вещества, но связана с важными параметрами, такими как молекулярная масса, форма молекул и т. д.

Ньютоновские и неньютоновские жидкости.

У большинства жидкостей (вода, низкомолекулярные органические соединения, истинные растворы, расплавленные металлы и их соли) коэффициент вязкости зависит только от природы жидкости и температуры. Такие жидкости называются ньютоновскими и силы внутреннего трения, возникающие в них, подчиняются закону Ньютона (формула 11).

У некоторых жидкостей, преимущественно высокомолекулярных (например, растворы полимеров) или представляющих дисперсионные системы (суспензии и эмульсии), η зависит также от режима течения - давления и градиента скорости. При их увеличении вязкость жидкости уменьшается вследствие нарушения внутренней структуры потока жидкости. Их вязкость характеризуют так называемым условным коэффициентом вязкости, который относится к определенным условиям течения жидкости (давление, скорость). Такие жидкости называются структурно вязкими или неньютоновскими.

Течение вязкой жидкости. Формула Пуазейля.

Занимаясь исследованием кровообращения, французский врач и физик Пуазейль пришел к необходимости количественного описания процессов течения вязкой жидкости вообще. Установленные им для этого случая закономерности имеют важное значение для понимания сущности гемодинамических явлений и их количественного описания.

Пуазейль установил, что вязкость жидкости может быть определена по объему жидкости, протекающей через капиллярную трубку. Этот метод применим только к случаю ламинарного течения жидкости.

Пусть на концах вертикальной капиллярной трубки длиной l и радиусом R создана постоянная разность давлений Δp . Выделим внутри капилляра столбик жидкости радиусом r и высотой h . На боковую поверхность этого столбика действует сила внутреннего трения:

Если p_1 и p_2 – давления на верхнее и нижнее сечения соответственно, то силы давления на эти сечения будут равны:

$$F_1 = p_1 \pi r^2 \quad \text{и} \quad F_2 = p_2 \pi r^2.$$

Сила тяжести равна $F_{\text{тяж}} = mgh = \rho \pi r^2 gl$.

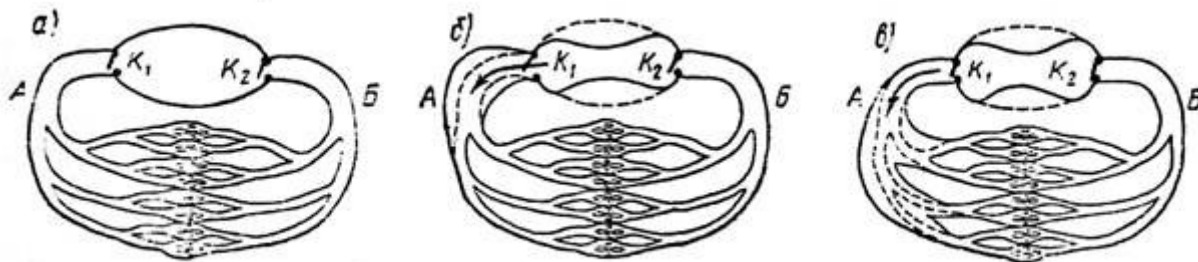
При установившемся движении жидкости, согласно второму закону Ньютона:

$$F_{\text{тр}} + F_{\text{давления}} + F_{\text{тяж}} = 0,$$

Учитывая, что $(p_1 - p_2) = \Delta p$, dv равно:

3. Физические свойства крови. Кровь, как неньютоновская жидкость. Вычисление работы сердца. Физическая модель сосудистой системы. Перераспределение энергии в эластичных стенках кровеносных сосудов и значение этого явления для кровообращения. Пульсовая волна.

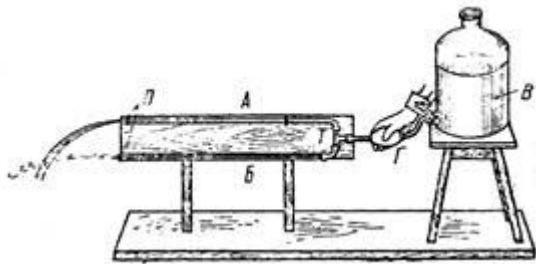
Физическая модель сосудистой системы. Работа сердца.



Физическую модель сердечно-сосудистой системы можно представить в виде замкнутой (не имеющей сообщения с атмосферой), многократно разветвленной и заполненной жидкостью системы трубок с эластичными стенками, движение жидкости в которой происходит под действием ритмически работающего нагнетательного насоса (на рис. в виде резиновой груши). При сжатии груши содержащийся

в ней объем жидкости проталкивается через отверстие клапана K_1 в систему трубок со стороны Л, вызывая в них продвижение жидкости в сторону Б, затем клапан K_1 запирается, груша расширяется и через клапан K_2 в нее поступает соответствующий объем жидкости со стороны Б системы.

Особенностью данной системы является, прежде всего, постепенное и множественное разветвление трубок, особенно в ее средней части. Последняя состоит из весьма большого числа коротких параллельных трубок малого сечения, общий просвет которых имеет настолько большое сечение, что скорость жидкости здесь снижается почти до нуля. Однако внутреннее трение в пристеночных слоях этих трубок настолько велико, что именно эта средняя часть системы представляет наибольшее сопротивление течению жидкости и обуславливает максимальное падение давления.



Другой особенностью системы является эластичность стенок трубок, благодаря которой при ритмической работе насоса ток жидкости в ней принимает равномерный характер. Допустим, что при сжатии груши некоторое количество жидкости поступает в трубку А, уже заполненную жидкостью под некоторым давлением. Давление в трубке А повышается, эластичные стенки ее растягиваются и вмещают избыток жидкости. Затем стенки трубки А постепенно сокращаются и прогоняют избыток жидкости в следующее звено системы, стенки которого также сначала растягиваются, затем сокращаются и таким образом проталкивают жидкость в последующие звенья системы трубок. В результате течение жидкости постепенно принимает равномерный характер. Иллюстрацией подобного явления может служить следующий опыт. Две трубки {Б — жесткая и А — с эластичными стенками} с помощью тройника Т присоединены к насосу-груше Г {В — резервуар с водой}. На конце трубок имеются пробки Я с небольшими отверстиями, препятствующие свободному вытеканию воды. При работе грушей можно наблюдать, как из трубы Б вытекает прерывистая струя, а из трубы А, стенки которой при этом периодически растягиваются и сокращаются — непрерывная.

Переходим к сосудистой системе. Начальное давление, необходимое для продвижения крови по всей сосудистой системе, создается работой сердца.

Рассмотрим схематически явления, происходящие в большом круге кровообращения. При каждом сокращении левого желудочка сердца в аорту, уже заполненную кровью под соответствующим давлением, выталкивается так называемый *ударный объем крови*, в среднем разный 65—70 мл. Затем клапаны аорты закрываются.

Поступивший в аорту дополнительный объем крови повышает давление в ней и соответственно растягивает ее стенки. Волна повышенного давления, которое называется *систолическим*, вызывает колебания сосудистых стенок, распространяющиеся вдоль более крупных артерий в виде упругой волны. Эта волна давления называется *пульсовой волной*, скорость ее распространения зависит от упругости сосудистых стенок и имеет порядок 6—8 м/с.

Затем в период расслабления сердечной мышцы (диастола, давление крови в этот момент называется *диастолическим*) стенки аорты постепенно, сокращаются до исходного положения и проталкивают поступивший объем крови в более отдаленные крупные артерии. Стенки последних в свою очередь растягиваются и затем, сокращаясь, проталкивают кровь в последующие звенья сосудистой системы. В результате ток крови принимает непрерывный характер со скоростью в крупных сосудах порядка 0,3—0,5 м/с.

При таком механизме продвижения крови только часть энергии, развешаемой сердечной мышцей при сокращении, передается непосредственно массе крови в аорте и переходит в ее кинетическую энергию. Остальная часть энергии переходит в потенциальную энергию деформации растяжения эластичных стенок крупных сосудов (преимущественно аорты) и затем уже постепенно по мере возвращения их в исходное положение передается массе крови в период расслабления сердечной мышцы. Существует также такое понятие как *пульсовое давление крови*, равное разности систолического и диастолического давления, составляющее в большом круге кровообращения примерно 40 мм рт. ст.

Количество Q крови, протекающее через поперечное сечение участка сосудистой системы в единицу времени и называемое *объемной скоростью кровотока*, зависит от разности давлений в начале и конце участка и его сопротивления току крови. При расчетах объемной скорости на отдельных участках сосудистой системы в первом приближении пользуются формулой Гагена — Пуазейля, хотя сопротивление току крови в сосудистой системе выше, чем следует по формуле, вследствие потерь

энергии при деформации ее эластичных стенок, а также неизбежных завихрений в местах разветвления. Точный расчет с учетом этих условий весьма сложен.

4. Гидростатическое давление крови. Физические основы методов измерения артериального давления.

Артериальное давление (АД) является важнейшим параметром системы кровообращения. Под ним понимают давление, создаваемое кровью в артериях, с учетом сосудистого тонуса. Измерение АД является одним из самых распространенных способов объективного исследования больных и здоровых.

Систематическое изменение АД является симптомом патологии кровообращения. Достоверные данные об уровне АД очень важны на всех этапах медицинского обследования, а также в профессиональной патологии, спортивной медицине, авиации, на транспорте.

Методы измерения давления

При измерении АД необходимы определенные анатомо-физиологические знания. В амбулаторно-клинической практике наиболее доступным и массовым считается непрямым, звуковой или аускультативный метод измерения. Отечественной промышленностью для этих целей выпускаются сфигмоманометры ПМР (диапазон измерения 0-260 мм рт. ст. с погрешностью ± 3 мм рт. ст.) и ПММ (мембранный манометр, диапазон 20—300 мм рт. ст. с погрешностью измерения ± 4 мм рт. ст.).

Звуковой метод измерения АД был открыт в 1905 г. Н. С. Коротковым. Он основан на феномене звучания сдавленной снаружи артерии. Различными исследованиями и практическими наблюдениями установлено много факторов, влияющих на подлинность показателей уровня АД при использовании этого широкодоступного метода.

При измерении АД этим способом надо учитывать состояние аппаратов (равномерность ртутного столба, исправность манжеты, груши, клапанов, манометра, герметичность соединения, время и результаты проверки аппаратов специалистами медтехники). Следует обращать внимание на естественные или микроклиматические условия, позу исследуемого, его состояние, предшествующую деятельность, питание, вредные привычки, окружность плеча и т. д. При определении АД исследуемого лучше всего усадить «ли уложить», рука должна быть свободна от стягивающей одежды. Причем предплечье и сердце должны располагаться примерно на одном уровне. Длина манжеты должна быть достаточна для того, чтобы не менее раза охватить плечо. Вообще ширина манжеты должна быть на 20 % больше диаметра плеча (12—14 см). При более широкой манжете регистрируемое АД будет ошибочно ниже, при более узкой — завышено.

5. Волны в упругих средах. Уравнение волны. Перенос энергии волной. Интенсивность волны.

Природа звука. Источники звука, высота, тембр и интенсивность. Звуковое давление. Спектральный состав звука. Акустические методы в ветеринарной клинике (перкуссия, аускультация).

Волны представляют собой изменения состояния среды (возмущения), распространяющиеся в этой среде и несущие с собой энергию. Иначе говоря, процесс распространения колебаний в пространстве называется волной. Наиболее важные и часто встречающиеся виды волн это упругие волны, волны на поверхности жидкости и электромагнитные волны. Колебания, возбужденные в какой-либо точке среды (твердой, жидкой или газообразной), распространяются в ней с конечной скоростью, зависящей от свойств среды, передаются от одной точки среды к другой. Чем дальше расположена частица среды от источника колебаний, тем позднее она начнет колебаться. Иначе говоря, увлекаемые частицы будут отставать по фазе от тех частиц, которые их увлекают. При изучении распространения колебаний не учитывается дискретное (молекулярное) строение среды. Среда рассматривается как сплошная, т.е. непрерывно распределенная в пространстве и обладающая упругими свойствами. Упругими или механическими волнами называются механические возмущения (деформации), распространяющиеся в упругой среде. Среда называется упругой, если ее деформации, вызываемые внешними воздействиями, полностью исчезают после прекращения этих воздействий. Частными случаями упругих волн являются звуковые и сейсмические волны (колебания, распространяющиеся в Земле от очагов землетрясений, взрывов и других источников). Волны на поверхности жидкости (поверхностные волны) — это распространяющиеся вдоль свободной поверхности жидкости (или поверхности раздела двух несмешивающихся жидкостей) возмущения этой поверхности, возникающие под влиянием внешних воздействий (падения тел, движения судов, ветра и тому подобное). В образовании и распространении этих волн определяющую роль играют силы поверхностного натяжения и тяжести. Основное свойство всех волн, независимо от их природы состоит в том, что в виде волны осуществляется перенос энергии без переноса вещества. Частицы среды, в которой распространяется волна не вовлекаются волной в поступательное движение, они лишь совершают колебания около своих положений равновесия. В зависимости от направления колебаний частиц по отношению к направлению, в котором распространяется волна.

Бегущими волнами называются волны, которые переносят в пространстве энергию. Перенос энергии волнами количественно характеризуется **вектором плотности потока энергии**. Этот вектор для упругих волн называется **вектором Умова** (по имени русского ученого Н. А. Умова (1846—1915), решившего задачу о распространении энергии в среде). Направление вектора Умова совпадает с направлением

переноса энергии, а его модуль равен энергии, переносимой волной за единицу времени через единичную площадку, расположенную перпендикулярно направлению распространения волны. Для вывода уравнения бегущей волны — зависимости смещения колеблющейся частицы от координат и времени — рассмотрим *плоскую волну*, предполагая, что колебания носят гармонический характер, а ось x совпадает с направлением распространения волны (рис. 220). В данном случае волновые поверхности перпендикулярны оси x , а так как все точки волновой поверхности колеблются одинаково, то смещение ξ будет зависеть только от x и t , т. е. $\xi = \xi(x, t)$.

Если среда, в которой распространяется одновременно несколько волн, *линейна*, т. е. ее свойства не изменяются под действием возмущений, создаваемых волной, то к ним применим **принцип суперпозиции (наложения) волн**: при распространении в линейной среде нескольких волн каждая из них распространяется так, как будто другие волны отсутствуют, а результирующее смещение частицы среды в любой момент времени равно геометрической сумме смещений, которые получают частицы, участвуя в каждом из слагающих волновых процессов. Исходя из принципа суперпозиции и разложения Фурье (см. (144.5)) любая волна может быть представлена в виде суммы гармонических волн, т. е. в виде волнового пакета, или группы волн. **Волновым пакетом** называется суперпозиция волн, мало отличающихся друг от друга по частоте, занимающая в каждый момент времени ограниченную область пространства. «Сконструлируем» простейший волновой пакет из двух распространяющихся вдоль положительного направления оси x гармонических волн с одинаковыми амплитудами, близкими частотами и волновыми числами, причем $d\omega \ll \omega$ и $dk \ll k$. Тогда Эта волна отличается от гармонической тем, что ее амплитуда

есть медленно изменяющаяся функция координаты x и времени t .

За скорость распространения этой негармонической волны (волнового пакета) принимают скорость перемещения максимума амплитуды волны, рассматривая тем самым максимум в качестве центра волнового пакета. При условии, что $td\omega = xdk = \text{const}$, получим

Скорость и есть **групповая скорость**. Ее можно определить как скорость движения группы волн, образующих в каждый момент времени локализованный в пространстве волновой пакет. Выражение (155.1) получено для волнового пакета из двух составляющих, однако можно доказать, что оно справедливо в самом общем случае. Рассмотрим связь между групповой (см. (155.1)) и фазовой $v = \omega/k$ (см. (154.8)) скоростями. Учитывая, что $k = 2\pi/\lambda$ (см. (154.3)), получим

или

Из формулы (155.2) вытекает, что u может быть как меньше, так и больше v в зависимости от знака $dv/d\lambda$. В недиспергирующей среде $dv/d\lambda = 0$ и групповая скорость совпадает с фазовой. Понятие групповой скорости очень важно, так как именно она фигурирует при измерении дальности в радиолокации, в системах управления космическими объектами и т. д. В теории относительности доказывалось, что групповая скорость $u \ll c$, в то время как для фазовой скорости ограничений не существует. $\angle/k.$

6. Психофизический закон Вебера-Фехнера. Уровень интенсивности звука. Бел и децибел. Громкость звука и единицы ее измерения. Пороги звукового ощущения у человека и некоторых животных. Шумомеры. Шум, как стресс-фактор, его влияние на живой организм и на продуктивность сельскохозяйственных животных. Борьба с шумом при интенсивном ведении животноводства и птицеводства. Физические основы звукоизлучательного и слухового аппаратов у животных.

Физические характеристики звука.

1. Скорость звука - скорость распространения волны в пространстве или фазовая скорость

$$v = \lambda \cdot \nu, \quad (5.1)$$

где λ - длина волны, ν - частота. Она зависит от свойств среды. Так, скорости волн в твердых средах и в газах можно вычислить по формулам Лапласа:

$$v_{\text{т}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}}; \quad (5.2)$$

$$v_{\text{г}} = \sqrt{\gamma \cdot \frac{R \cdot T}{M}}, \quad (5.3)$$

где ρ – плотность среды, M – молярная масса, T – температура, R – универсальная газовая постоянная, G – модуль сдвига, γ – постоянная адиабаты.

2. **Интенсивность звука** – энергия E , переносимая звуковой волной за единицу времени через единицу поверхности площади S , перпендикулярной направлению распространения волны:

$$I = \frac{E}{S \cdot t} \quad (5.4)$$

3. **Избыточное давление** – это давление, создаваемое звуковой волной сверх атмосферного давления.

$$\Delta p = \sqrt{2 \cdot I \cdot \rho \cdot v} \quad (5.5)$$

где ρ – плотность вещества, v – фазовая скорость звуковой волны.

4. **Громкость (слышимость)** – субъективная оценка силы звука, воспринимаемая ухом. Для данной частоты громкость определяется амплитудой колебаний.

5. **Высота** (бас, тенор) – субъективная характеристика, определяемая частотой колебаний.

6. **Тембр** – субъективная характеристика оттенка (индивидуальности) звука, определяемая наличием других частот.

5.2

Известно, что источником звука является колеблющееся тело.

Основные механизмы излучения звука в живой природе:

1. **Фрикционный или стридуляционный.** Издаётся трением подвижно сочлененных органов (ракообразные, пауки, прямокрылые).

2. **Тимбальный.** Звуковой сигнал издаётся с помощью вибраций специализированных мембран (цикады).

3. **Пневматический.** Воздух с шумом пропускается через отверстия (бабочка Мертвая голова, копытные).

4. **Ударный.** Звуковой сигнал получается в результате удара частями тела о субстрат (дятел, жук-точильщик).

У животных орган слуха развит неодинаково. Не все насекомые воспринимают звук. Орган слуха обычно есть у тех насекомых, которые сами издают звуки. У кузнечиков орган слуха расположен на голени передних ног, у саранчи – по бокам брюшка, у дневных бабочек – у основания передних крыльев.

Хорошо слышат птицы и звери. У некоторых животных слух «заменяет» зрение. Издавая звуки, и чутко прислушиваясь к их отражению, животные обнаруживают добычу, препятствия.

Слуховой аппарат животных приспособлен к восприятию сравнительно тихих звуков, так как слишком громкие звуки в природе встречаются редко. Специальными опытами на животных доказана возможность «акустического шока» и «акустических судорог», иногда смертельных. В условиях постоянного шума взрослые животные покидают места обитания, а молодые теряются и гибнут.

7. Инфразвук и его свойства. Действие инфразвука на животных (разрыв кровеносных сосудов при большой интенсивности, изменение частоты альфа-ритма мозга, действие на вестибулярный аппарат и пр.). источники инфразвука в природе и при промышленном ведении животноводства.

Инфразвук в природе является её неотъемлемой частью. Хотя мы его и не слышим, он содержится в шуме моря, леса и даже атмосферы. А его источником являются такие природные явления как гром и человеческие деяния как взрывы и выстрелы.

Так же не стоит забывать про земную кору, движения которой так же вызывают инфразвуковые колебания. Например, когда вы летите на самолете сквозь облака, казалось бы, бесшумный разрыв облаков, а, оказывается, имеет свой звуковой диапазон.

Способность инфразвука распространяться на большие расстояния, помогает людям ориентироваться. К примеру, если нужно определить местонахождение сильного взрыва. Инфразвук распространяется так же в море, что позволяет людям предсказать стихийное бедствие.

В природе инфразвук содержится не только благодаря действиям человека, но и сам по себе.

При сильном ветре над морем возникают инфразвуковые волны, это происходит из-за вихреобразования волн. А благодаря тому, что скорость инфразвука быстрее скорости шторма мы можем предсказать шторм.

А так же не будем забывать про животных, некоторые из них могут слышать инфразвук. Поэтому медузы, слышащие инфразвуковые волны, оповещение о шторме, ещё за 20 минут до начала уже все знают и уходят на глубину.

Дельфины могут слышать звуки примерно в 30 раз ниже и в 10 раз выше слухового диапазона человека. У дельфинов нет возможности хорошо видеть своё окружающую среду, поэтому они делают это с помощью звука, слушая эхо, которое отражается от окружающих предметов. Это позволяет им не хуже чем нам воспринимать то, что находится вокруг них, так как отражение звука дает им полную информацию формы, размером материалов, иными словами всего, что их окружает.

Человек тоже часть природы, рассмотрим воздействие инфразвука на человека.

Гавро, французский исследователь обнаружил, что инфразвук на определенных частотах может вызвать у человека неудобства, а именно чувства тревоги, беспокойства. Более того, существует такая чистота инфразвука, а именно 7 Гц, которая может привести к летальному исходу человека.

Из-за чего же это происходит? Медики исследовали резонанс, резонанс брюшной полости человека, который возникал при инфразвуковых волнах 4-8 Гц. Исследователи стягивали область брюшной полости ремнями. Это несколько помогло, чистота резонанса повысилась, но физиологическое воздействие не стало слабее.

Так же резонируют и легкие, более того, они оказывают самое малое сопротивление, из-за чего, в конце концов, стенки легких повреждаются.

Инфразвук так же негативно влияет на кровеносные сосуды, французские исследователи определили, что при воздействии на человека инфразвука с чистотой близко 7,5 Гц – изменяется чистота дыхания, ритм сердца, повышается утомляемость, а так же страдают функции слуха и зрения.

И так, инфразвук в природе играет как позитивную, так и негативную роль. Слишком низкие чистоты инфразвука могут и негативно влиять на человека. Но тем не менее благодаря инфразвуку мы можем предвещать стихийные бедствия, благодаря ему некоторые животные могут прекрасно ориентироваться в пространстве, не видя его, так же инфразвук дает им возможность общаться.

8. Ультразвук, методы его получения и регистрации (пьезоэлектрический и магнитострикционный). Физические свойства ультразвука. Взаимодействие ультразвука с веществом. Отражение звуковой волны на границе раздела двух сред. Понятие об акустическом сопротивлении среды. Ультразвук в мире животных. Использование ультразвука в ветеринарной хирургии, терапии и диагностике.

Понятие о диагностике, основанной на эффекте Доплера.

Ультразвуком называются звуковые колебания, лежащие выше порога восприятия органа слуха человека. Пьезоэффект, благодаря которому получают ультразвуковые колебания, был открыт в 1881 году братьями П. Кюри и Ж.-П. Кюри. Свое применение он нашел во время первой мировой войны, когда К.В. Шиловский и П. Ланжевен разработали сонар, использовавшийся для навигации судов, определения расстояния для цели и поиска подводных лодок. В 1929 году С.Я. Соколов применил ультразвук для неразрушающего контроля в металлургии (дефектоскопия). Этот крупнейший советский физик-акустик явился родоначальником ультразвуковой интроскопии и автором наиболее часто используемых и совершенно различных по своей сути методов современного звуковидения.

Попытки использования ультразвука в целях медицинской диагностики привели к появлению в 1937 году одномерной эхоэнцефалографии. Однако лишь в начале пятидесятых годов удалось получить ультразвуковое изображение внутренних органов и тканей человека. С этого момента ультразвуковая диагностика стала широко применяться в лучевой диагностике многих заболеваний и повреждений внутренних органов.

Биофизика ультразвука.

С точки зрения физики ультразвука ткани человеческого тела близки по своим свойствам жидкой среде, поэтому давление на них ультразвуковой волны может быть описано как сила, действующая на жидкость.

Изменение давления в среде может происходить перпендикулярно в плоскости вибрации источника ультразвука. В этом случае волну называют продольной. В ультразвуковой диагностике основную информацию несут преимущественно продольные волны. В твердых телах, например, в костях или металлах, возникают поперечные волны.

Звуковые волны являются механическими по своей природе, так как в основе их лежит смещение частиц упругой среды от точки равновесия. Именно за счет упругости и происходит передача звуковой энергии через ткань. Упругость – это возможность объекта после сжатия или растяжения вновь приобретать свой размер и форму. Скорость распространения ультразвука зависит прежде всего от упругости и от плотности ткани. Чем больше плотность материала, тем медленнее должны распространяться в нем (при одинаковой упругости) ультразвуковые волны. Но к этому физическому параметру следует подходить с осторожностью. Скорость звука при прохождении его через разные среды биологического организма может быть различной, в таблице представлены скорости распространения ультразвука в различных средах.

Материал

Скорость звука ($\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$)

Мягкие ткани (в среднем)

1540

Головной мозг

1541

Жир

1450

Печень

1549

Почка

1561

Мышцы

1585

Кости черепа

4080

Для различных типов ультразвуковых исследований применяются разные виды ультразвуковых волн. Наиболее важными параметрами являются частота излучения, диаметр поверхности транзюссера и фокусировка ультразвукового пучка. В системах медицинской ультразвуковой диагностики обычно используются частоты 1; 1,6; 2,25; 3,5; 5 и 10 МГц.

В аппаратах имеется возможность регулировать излучаемый и принимаемые сигналы, так же имеется возможность усиления изображения эхосигналов.

Лучевая безопасность ультразвукового исследования

Ультразвук широко используется в медицине, хотя в отличие от технической сферы где применяется низкочастотный ультразвук, для которого имеются нормы излучения, в медицине все обстоит гораздо сложнее. С одной стороны, отсутствует возможность провести прямую дозиметрию излучения в рабочем пучке, особенно на глубине; с другой же, - очень трудно учесть рассеяние, поглощение и ослабление ультразвука биологическими тканями. Кроме того, при работе с аппаратами реального масштаба времени практически невозможно учесть и экспозицию, так как длительность озвучивания, а так же его направление и глубина варьируют в широких пределах.

Распространение ультразвука в биологических средах сопровождается механическим, термическим, и физико-химическими эффектами. В результате поглощения ультразвука тканями акустическая энергия превращается в тепловую. Другим видом механического действия является кавитация, которая приводит к разрывам в месте прохождения ультразвуковой волны.

Все эти явления происходят при воздействии на биологические ткани ультразвука высокой интенсивности, и в известных условиях они желательны, например, в физиотерапевтической практике. При диагностике эти эффекты не возникают в результате использования ультразвука небольшой интенсивности – не более 50 мВт*см². Конструктивно приборы для ультразвуковой медицинской диагностики надежно защищают пациента от возможного вредного воздействия звуковой энергии. Однако в последнее время все чаще появляются работы о неблагоприятном воздействии ультразвукового исследования на пациента. В частности это относится к ультразвуковому исследованию в акушерстве. Уже доказано что ультразвук неблагоприятно воздействует на хромосомы, в частности может приводить к мутациям плода. В некоторых странах, например Япония ультразвуковое исследование беременным проводится только после серьезного обоснования необходимости данного исследования. Несомненно воздействие ультразвука на самого врача, который длительное время находится под воздействием ультразвука. Имеются сообщения что со временем поражаются кисть руки которой врач держит датчик.

Источники инфразвука

Естественные источники

Возникает при землетрясениях, во время бурь и ураганов, цунами. При помощи достаточно сильных инфразвуков (более 60 дБ) общаются между собой киты.

Техногенные источники

К основным техногенным источникам инфразвука относится мощное оборудование —

станки, котельные, транспорт, подводные и подземные взрывы. Кроме того, инфразвук излучают ветряные электростанции и, в некоторых случаях, вентиляционные шахты.

Распространение инфразвука

Для инфразвука характерно малое поглощение в различных средах, вследствие чего инфразвуковые волны в воздухе, воде и в земной коре могут распространяться на очень дальние расстояния. Поскольку инфразвук либо поглощается, он распространяется на большие расстояния и может служить предвестником бурь, ураганов, цунами. Это явление находит практическое применение при определении места сильных взрывов или положения стреляющего орудия. Звуки взрывов, содержащие большое количество инфразвуковых частот, применяются для исследования верхних слоев атмосферы, свойств водной среды.

Физиологическое действие инфразвука

Органы человека, как и любое физическое тело, имеют собственную резонансную частоту. Под воздействием звука с этой частотой они могут испытывать внутреннее изменение структуры, вплоть до потери собственной работоспособности. Предполагается, что на этом принципе может быть создано инфразвуковое оружие. Также при совпадении воздействующего звука с ритмами мозга, такими как альфа-ритм, бета-ритм, гамма-ритм, дельта-ритм, тета-ритм, каппа-ритм, мю-ритм, сигма-ритм и др., может возникнуть нарушение активности церебральных механизмов мозга.

Все случаи контакта человека и инфразвука можно поделить на две большие группы: контакты в пространстве, не ограниченном жесткими стенками, и контакты в помещениях, то есть в пространстве, ограниченном жесткими стенками. Таким образом, с точки зрения акустики, это контакты с бегущей волной (в первом случае) и контакты в полости резонатора (во втором случае).

Следует принимать особые меры защиты против появления звуковых колебаний со следующими частотами, потому что совпадение частот приводит к возникновению резонанса ^[источник не указан 73 дня].

- 5-30 Гц (резонанс головы)
- 19 Гц (резонанс глаз)
- 0.5-13 Гц (резонанс вестибулярного аппарата)
- 4-6 Гц (резонанс сердца)
- 2-3 Гц (резонанс желудка)
- 2-4 Гц (резонанс кишечника)
- 6-8 Гц (резонанс почек)
- 2-5 Гц (резонанс рук)

Физиологическое действие инфразвука на открытом пространстве

Рассмотрим в качестве примера вредную для человеческого организма стоячую волну частотой в 7 Гц, названную академиком Шулейкиным голос моря ^[2], образующуюся по принципу, схожему с образованием стоячей волны в трубе, у которой один конец открыт, а другой закрыт. Для такой трубы, открытой с одного конца, основная частота $f = v/4L$, где v — скорость звука в среде, L — длина трубы. Таким образом, опасный для человека инфразвук может образовываться в море с глубиной в $h = v/4f + k \cdot v/f$ ($k=0, 1, 2, 3...$) и ровным донным рельефом, что соответствует глубинам около $50 + 200 \cdot k$ метров, в зависимости от солёности и температуры воды.

Физиологическое действие инфразвука в помещении

В процессе трудовой деятельности большинство контактов человека и инфразвука (ИЗ) происходит в пространстве, ограниченном жесткими стенками.

С физической точки зрения все многообразие помещений может быть сведено к резонаторам двух типов: резонатору типа Гельмгольца и резонатору типа труба. В эксперименте ^[источник не указан 439 дней] показано, что даже небольшая, по сравнению с длиной ИЗ волны, комната может служить четвертьволновым резонатором частотой 5,5 Гц.

Таким образом, человек, в силу привычки или служебной необходимости находящийся в той или иной части помещения, будет контактировать с различными физическими компонентами распределенной в пространстве помещения акустической волны. С точки зрения биологии контакт с разными раздражителями должен вызывать разную ответную реакцию органов и систем.

Экспериментально показано, что нахождение в разных частях даже небольшого помещения способно вызывать разнонаправленную реакцию органов и систем человека и животных. Выделена зона градиента ИЗ волны, в которой падает работоспособность, уменьшается частота различия звуковых импульсов и световых мельканий, резко активизируется активность симпатического звена регуляции сосудистой системы и развивается реакция гиперкоагуляции крови. Это связано с прямым действием ИЗ на стенки кровеносных сосудов ^[источник не указан 439 дней].

В то же время у людей и животных, находящихся в противоположном конце помещения, умеренно, но статистически достоверно, растет работоспособность, уменьшается активность свертывающих систем крови и улучшаются показатели реакции на частоту световых мельканий.

Зависимость ответной реакции организма на нахождение человека и животных в разных частях одного и того же помещения сохранялась в пределах проверенной интенсивности ИЗ от 80 до 120 дБ (что соответствует уровням громкости обычного звука от «Опасный для здоровья» до «Болевой порог») и частотах 8, 10 и 12 Гц.

Никаких психических реакций на наиболее часто встречающиеся в промышленности уровни ИЗ выявлено не было. Данные опытов указывают, что ИЗ, даже невысокой интенсивности, в зависимости от местонахождения подопытного объекта, может быть небезопасен для здоровья и может, в то же самое время, обладать положительным стимулирующим эффектом.

Зональная биологическая активность ИЗ может послужить основой сравнительно простых способов защиты от ИЗ, основанных на выведении рабочего места человека-оператора из биологически вредной зоны.

Медузы и инфразвуки

На краю купола медузы расположены примитивные глаза, статоцисты и слуховые колбочки. Размеры их сравнимы с размерами булавочной головки. С их помощью медузы воспринимают инфразвуки с частотой 8—13 Гц.

Перед штормом усиливающийся ветер срывает гребни волн и захлестывает их. Каждое такое захлопывание волны на гребне волны порождает акустический удар, создаются инфразвуковые колебания, расходящиеся на сотни километров, их улавливает медуза. Купол медузы усиливает инфразвуковые колебания, как рупор, и передает на слуховые колбочки. Восприняв этот сигнал, медузы уходят на дно за 20 часов до начала шторма данной местности.

Бионики создали технику, предсказывающую бури, работа которых основана на принципе работы инфрауха медузы. Такой прибор может предупредить о надвигающейся буре за 15 часов, а не за два, как обычный морской барометр.

Лекция №4 (2 часа)

Тема: Основы молекулярно-кинетической теории. Реальные газы.

1.4.1 Вопросы лекции:

1. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории газа. Внутренняя энергия идеального газа.
2. Явление переноса: диффузия, теплопроводность, внутреннее трение. Законы Фика и Фурье. Явления переноса в биологических системах: диффузионные процессы в легких, в клеточных мембранах; диффузия газов в почве.
3. Физические основы терморегуляции организма. Теплопроводность и конвекция в сельском хозяйстве.
4. Учет размеров молекул и сил притяжения между ними в реальных газах. Уравнение Ван дер Ваальса.
Сжижение газов, их хранение и применение в ветеринарии (искусственное осеменение, консервация вирусов и др.).
5. Влажность и методы ее определения. Понятие о микроклимате и его значение в промышленном животноводстве.

1.4.2 Краткое содержание вопросов

1. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории газа. Внутренняя энергия идеального газа.

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, $T = \text{const}$). Для данной массы газа при постоянной температуре произведение давления газа на его объём есть величина постоянная:

$$PV = \text{const} \quad (1.1)$$

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

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

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

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

3. Закон Шарля (изохорный процесс, $V = \text{const}$). Давление данной массы газа при постоянном объёме изменяется линейно с температурой:

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

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

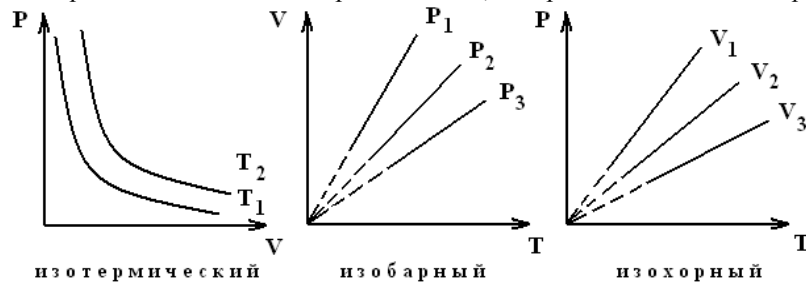


Рис. 1

4. Закон Авогадро. При равных давлениях и температурах в одинаковых объёмах содержится одинаковое число молекул. В одном моле различных веществ содержится одно и тоже число молекул – постоянная Авогадро $N_A = 6,023 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$.

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

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

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, \bar{v}, E и т.д.). Давление газа на стенки сосуда:

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

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

$$\bar{E}_k = \frac{m \bar{v}_{\text{кв}}^2}{2} \quad \text{– средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул, } \bar{v}_{\text{кв}}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i^2 \quad \text{– квадрат средней квадратичной скорости молекул.}$$

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

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

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

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

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

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

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

Уравнение состояния идеального газа. Уравнение Менделеева – Клапейрона.

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

(2.6) – уравнение состояния идеального газа.

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

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

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

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

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

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

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

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

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:

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

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

$$\Delta U = \frac{i}{2} \frac{M}{\mu} R \Delta T \quad \text{зависит от изменения температуры.}$$

2. Явление переноса: диффузия, теплопроводность, внутреннее трение. Законы Фика и Фурье. Явления переноса в биологических системах: диффузионные процессы в легких, в клеточных мембранах; диффузия газов в почве.

Переноса явления— кинетические процессы, необратимые процессы, в результате которых в физической системе происходит пространственный перенос электрического заряда, массы, импульса, энергии, энтропии или какой-либо др. физической величины. Для всех этих явлений перенос всегда происходит в направлении обратном ингрдиента, т.е. система приближается к состоянию термодинамического равновесия.

Диффузия— самопроизвольное проникновение или перемешивание частиц 2-х или нескольких соприкасающихся тел. Существует до тех пор, пока существует градиент плотности.

Закон диффузии Фика: плотность потока массы вещества, переносимых через единицу площади за единицу времени прямопропорционально dp/dx . $j_m = -D \cdot dp/dx$; $D = 1/3 \langle v \rangle \langle l \rangle$; $M = -D \cdot dp/dx \cdot St$

Теплопроводность— перенос теплоты вследствие градиента температуры.

Если в одной области газа средняя кинетическая энергия молекул больше, чем в другой, то с течением времени вследствие постоянных столкновений молекул происходит процесс выравнивания средних кинетических энергий молекул, т. е. выравнивание температур.

Закон теплопроводности Фурье:

Плотность теплового потока, переносимого в единицу времени, через единицу площади прямопропорционально: dT/dx .

$$j_{\text{г}} = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad \text{где } j_{\text{г}} \text{ — плотность теплового потока, } \lambda \text{ — теплопроводность, } dT/dx \text{ — градиент температуры.}$$

$$\lambda = \frac{1}{3} C_v \rho \langle v \rangle \langle l \rangle$$

—теплопроводность, где C_v — удельная теплоемкость газа при постоянном объеме, ρ — плотность газа, $\langle v \rangle$ — средняя скорость теплового движения молекул, $\langle l \rangle$ — средняя длина свободного пробега

Вязкое течение— перенос импульса, связанный с градиентом средней массовой скорости.

Закон Ньютона для вязкости: плотность потока импульса, переносимого за единицу времени через единицу площади прямопропорционально градиенту скорости dv/dx .

$$\eta = \frac{1}{3} n m \lambda \bar{v}$$

—динамический коэффициент вязкости

3. Физические основы терморегуляции организма. Теплопроводность и конвекция в сельском хозяйстве.

Температура оказывает существенное влияние на протекание жизненных процессов в организме человека и на его физиологическую активность. Процессы жизнедеятельности ограничены узким диапазоном температуры внутренней среды, в котором могут происходить основные ферментативные реакции. Для человека снижение температуры тела ниже 25°C и её увеличение выше 43°C, как правило, смертельно. Особенно чувствительны к изменениям температуры нервные клетки.

Высокая температура вызывает интенсивное потоотделение, что приводит к обезвоживанию организма, потере минеральных солей и водорастворимых витаминов. Следствием этих процессов является сгущение крови, нарушение солевого обмена, желудочной секреции, развитие витаминного дефицита. Допустимое снижение веса при испарении составляет 2-3%. При потере веса от испарения в 6% нарушается умственная деятельность, а при 15-20% потери веса наступает смерть. Систематическое действие высокой температуры вызывает изменения в сердечно-сосудистой системе: учащение пульса, изменение артериального давления,

ослабление функциональной способности сердца. Длительное воздействие высокой температуры приводит к накоплению тепла в организме, при этом температура тела может повыситься до 38–41°C и может возникнуть тепловой удар с потерей сознания.

Низкие температуры могут быть причинами охлаждения и переохлаждения организма. При охлаждении в организме рефлекторно уменьшается теплоотдача и усиливается теплопродукция. Уменьшение теплоотдачи происходит за счёт спазма (сужения) сосудов, увеличения термического сопротивления тканей организма. Длительное воздействие низкой температуры приводит к стойкому сосудистому спазму, нарушению питания тканей. Рост теплопродукции при охлаждении достигается усилением окислительных обменных процессов в организме (понижение температуры тела на 1°C сопровождается приростом обменных процессов на 10°C). Воздействие низких температур сопровождается увеличением артериального давления, объёмом вдоха и уменьшением частоты дыхания. Охлаждение организма изменяет углеводный обмен. Большое охлаждение сопровождается снижением температуры тела, угнетением функций органов и систем организма.

Б. Ядро и внешняя оболочка тела.

С точки зрения терморегуляции тело человека можно представить состоящим из двух компонентов – внешней **оболочки** и внутреннего **ядра**.

Ядро – это часть тела, которая имеет постоянную температуру (внутренние органы), а **оболочка** – часть тела, в которой имеется температурный градиент (это ткани поверхностного слоя тела толщиной 2,5 см). Через оболочку идёт теплообмен между ядром и окружающей средой, то есть изменения теплопроводности оболочки определяют постоянство температуры ядра. Теплопроводность изменяется за счёт изменения кровоснабжения и кровенаполнения тканей оболочки.

Температура разных участков ядра различна. Например, в печени: 37.8–38.0°C, в мозге: 36.9–37.8°C. В целом же температура ядра человека составляет **37.0°C**. Это достигается с помощью процессов эндогенной терморегуляции, результатом которой является устойчивое равновесие между количеством продуцируемого в организме в единицу времени тепла (**теплопродукцией**) и количеством тепла, рассеиваемого организмом за то же время в окружающую среду (**теплоотдачей**).

Температура кожи человека на различных участках колеблется от 24.4°C до 34.4°C. Самая низкая температура наблюдается на пальцах ног, самая высокая – в подмышечной впадине. Именно на основании измерения температуры в подмышечной впадине обычно судят о температуре тела в данный момент времени.

По усреднённым данным, средняя температура кожи обнажённого человека в условиях комфортной температуры воздуха составляет 33–34°C. Существуют суточные колебания температуры тела. Амплитуда колебаний может достигать 1°C. Температура тела минимальна в предутренние часы (3–4 часа) и максимальна в дневное время (16–18 часов).

Известно также явление асимметрии температуры. Она наблюдается примерно в 54% случаев, причём температура в левой подмышечной впадине несколько выше, чем в правой. Возможна асимметрия и на других участках кожи, а выраженность асимметрии более чем в 0,5°C свидетельствует о патологии.

В. Теплообмен. Баланс теплообразования и теплоотдачи в организме человека.

Процессы жизнедеятельности человека сопровождаются непрерывным теплообразованием в его организме и отдачей образованного тепла в окружающую среду. Обмен тепловой энергии между организмом и окружающей средой называется **теплообменом**. Теплопродукция и теплоотдача обусловлены деятельностью центральной нервной системы, регулирующей обмен веществ, кровообращение, потоотделение и деятельность скелетных мышц.

Организм человека – это саморегулируемая система с внутренним источником тепла, в которой в нормальных условиях теплопродукция (количество образованного тепла) равна количеству тепла, отданного во внешнюю среду (теплоотдаче). Постоянство температуры тела называется **изотермией**. Она обеспечивает независимость обменных процессов в тканях и органах от колебаний температуры окружающей среды.

Внутренняя температура тела человека постоянна (36.5–37°C) благодаря регулированию интенсивности теплопродукции и теплоотдачи в зависимости от температуры внешней среды. А температура кожи человека при воздействии внешних условий может изменяться в относительно широких пределах.

В теле человека за 1 час образуется столько тепла, сколько нужно, чтобы вскипятить 1 литр ледяной воды. И если бы тело было непроницаемым для тепла футляром, то уже через час температура тела поднялась бы примерно на 1.5°C, а часов через 40 достигла бы точки кипения воды. Во время тяжёлой физической работы образование тепла увеличивается ещё в несколько раз. И всё же температура нашего тела не меняется. Почему? Всё дело именно в уравнивании процессов образования и отдачи тепла в организме.

Ведущим фактором, определяющим уровень теплового баланса, является **температура окружающей среды**. При её отклонении от комфортной зоны в организме устанавливается новый уровень теплового баланса, обеспечивающий изотермию в новых условиях среды. Такое постоянство температуры тела

обеспечивается механизмом **терморегуляции**, включающим процесс теплообразования и процесс тепловыделения, которые регулируются нервно-эндокринным путём.

Г. Понятие терморегуляции организма.

Терморегуляция – это совокупность физиологических процессов, направленных на поддержание относительного постоянства температуры ядра организма в условиях изменения температуры среды с помощью регуляции теплопродукции и теплоотдачи. Терморегуляция направлена на предупреждение нарушений теплового баланса организма или на его восстановление, если подобные нарушения уже произошли, и осуществляется нервно-гуморальным путём.

Принято считать, что терморегуляция свойственна лишь гомойотермным животным (к ним относятся млекопитающие (в том числе человек), и птицы), организм которых обладает способностью поддерживать температуру внутренних областей тела на относительно постоянном и достаточно высоком уровне (около 37-38°C у млекопитающих и 40-42°C у птиц) независимо от изменений температуры окружающей среды.

Механизм терморегуляции можно представить в виде кибернетической самоуправляющей системы с обратными связями. Температурные колебания окружающего воздуха действуют на специальные рецепторные образования (**терморецепторы**), чувствительные к изменению температуры. Терморецепторы передают в центры терморегуляции информацию о тепловом состоянии органа, в свою очередь, центры терморегуляции через нервные волокна, гормоны и другие биологически активные вещества изменяют уровень теплоотдачи и теплопродукции или участков тела (местная терморегуляция), или организма в целом. При выключении центров терморегуляции специальными химическими веществами организм утрачивает способность к поддержанию постоянства температуры. Эту особенность в последние годы используют в медицине для искусственного охлаждения организма во время сложных хирургических операций на сердце.

4. Учет размеров молекул и сил притяжения между ними в реальных газах. Уравнение Ван дер Ваальса. Сжижение газов, их хранение и применение в ветеринарии (искусственное осеменение, консервация вирусов и др.).

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

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

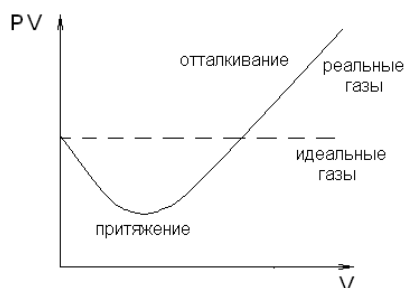


Рис. 14

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

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

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

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

Ввел поправки, учитывающие размеры молекул и их взаимодействие:

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

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

Здесь V_μ – объем одного моля идеального газа, N_A – число Авогадро, V' – объем одной молекулы, $b = 4N_A V'$ – поправка на объем, занимаемый самими молекулами.

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

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

Здесь a – поправка, характеризующая взаимодействие молекул.

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

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

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

Уравнение состояния реального газа любой массы имеет вид:

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

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

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

Изотермы Ван-дер-Ваальса и экспериментальные изотермы Эндрюса

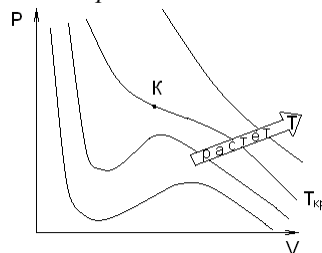


Рис. 15

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

В 1861 – 1869 гг. Т. Эндрюс проводил опыты по сжижению CO_2 . Он исследовал ход изотерм углекислоты при различных температурах и на основании этих исследований ввёл понятие критической температуры для CO_2 и она оказалась равной $31^\circ C$ (304 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.

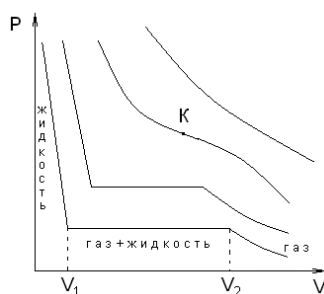


Рис. 16

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

5. Влажность и методы ее определения. Понятие о микроклимате и его значение в промышленном животноводстве.

Микроклимат - искусственно создаваемые климатические условия в закрытых помещениях (напр., в жилище) для защиты от неблагоприятных внешних воздействий и создания зоны комфорта. Зона комфорта - оптимальное для организма человека сочетание температуры, влажности, скорости движения воздуха и воздействия лучистого тепла (напр., в состоянии покоя или при выполнении легкой физической работы: температура зимой 18-22 °С, летом 23-25 °С; скорость движения воздуха зимой 0,15, летом 0,2-0,4 м/с; относительная влажность 40-60%). Тесно соприкасаясь с воздушной средой, организм человека подвергается воздействию ее физических и химических факторов: состава воздуха, температуры, влажности, скорости движения воздуха, барометрического давления и др. Особое внимание следует уделить параметрам микроклимата помещений — аудиторий, производственных и жилых зданий. Микроклимат, оказывая непосредственное воздействие на один из важнейших физиологических процессов — терморегуляцию, имеет огромное значение для поддержания комфортного состояния организма.

Терморегуляция — это совокупность процессов, обеспечивающих равновесие между теплопродукцией и теплоотдачей, благодаря которому температура тела человека остается постоянной. Поддержание микроклимата осуществляются разными способами:

Вентиляция — организованный и регулируемый воздухообмен, обеспечивающий удаление из помещения отработанного воздуха и подачу на его место свежего. Естественная неорганизованная вентиляция осуществляется за счет разности давления снаружи и внутри помещения. Для жилых помещений смена воздуха (инфильтрация) может достигать 0,5—0,75 объема в час, для промышленных 1,0—1,5 объема в час. Естественная организованная, канальная вентиляция проектируется в жилых и общественных зданиях. При обтекании ветром выхода вытяжной шахты, имеющей иногда насадку-дефлектор, создается разрежение, зависящее от скорости ветра и возникает поток воздуха в вентиляционной системе. **Аэрация** — организованная естественная вентиляция помещений через фрамуги, форточки, окна.

Механическая вентиляция — это такая вентиляция, при которой воздух подается (приточная) или удаляется (вытяжная) с помощью специальных устройств — компрессоров, насосов и др. Различают вентиляцию общеобменную (для всего помещения) и местную (для определенных рабочих мест). При механической вентиляции воздух может предварительно проходить через систему фильтров, очищаться, а в удаляемом воздухе могут улавливаться вредные примеси. Недостатком механической вентиляции является создаваемый ею шум. **Кондиционирование** — искусственная автоматическая обработка воздуха с целью поддержания оптимальных микроклиматических условий независимо от характера технологического процесса и условий внешней среды. В ряде случаев при кондиционировании воздух проходит дополнительную специальную обработку — обеспыливание, увлажнение, озонирование и др. Значительно уменьшает воздействие тепла на организм применение экранирования. Экраны могут быть теплоотражающие, теплопоглощающие, теплопроводящие.

Лекция №5 (2 часа)

Тема: Физические основы термодинамики.

1.5.1 Вопросы лекции:

1. Термодинамические параметры и процессы. Теплота и работа. Первое начало термодинамики. Работа газа в изопроцессах.
2. Теплоемкости идеального газа. Уравнение Майера. Адиабатический процесс. Уравнение Пуассона.
3. Обратимые и необратимые процессы. Второе начало термодинамики Цикл Карно и его к.п.д.

1.5.2 Краткое содержание вопросов

1. Термодинамические параметры и процессы. Теплота и работа. Первое начало термодинамики. Работа газа в изопроцессах.

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:

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

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

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

Количество теплоты

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

$$Q = Cm\Delta T \quad (1.3)$$

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

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

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

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

Внутренняя энергия

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

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

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

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

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

4) Аддитивность.

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

Работа

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

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

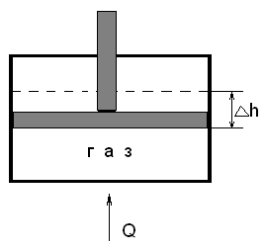


Рис. 8

Работа $A = \int_1^2 F dh$, так как $F = PS$, $\Rightarrow A = \int_1^2 PS dh = \int_1^2 P dV$.

$$A = \int_1^2 P dV \quad (1.7)$$

В случае если $P = \text{const}$:

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

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

2. Теплоемкости идеального газа. Уравнение Майера. Адиабатический процесс. Уравнение Пуассона.

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

Способы получения:

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

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

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

Внутренняя энергия меняется только за счёт совершения работы.

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

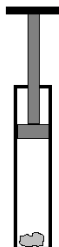


Рис. 9

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

Выражение (3.2) называется *уравнением Пуассона*. Величина равная отношению

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{i+2}{i}$$

называется *коэффициентом Пуассона*.

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

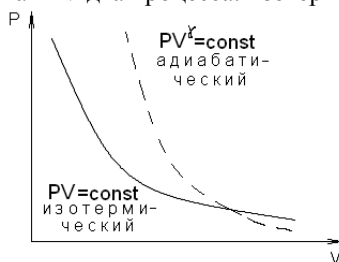


Рис. 10

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

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

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

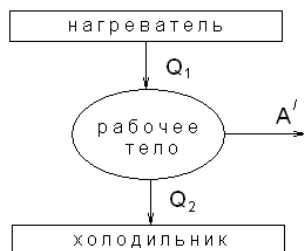


Рис. 11

Q_1 – количество теплоты за один цикл. Рабочее тело часть этого тепла использует на работу, а часть тепла Q_2 бесполезно теряется ($\frac{Q_2}{Q_1}$ – коэффициент бесполезного действия). Коэффициент полезного действия реальной тепловой машины:

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

3. Обратимые и необратимые процессы. Второе начало термодинамики Цикл Карно и его к.п.д.

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

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

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

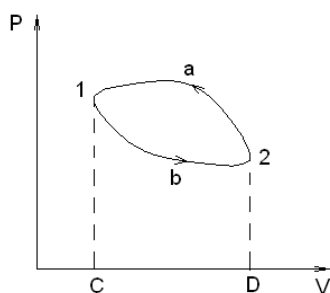


Рис. 12 – Круговой процесс

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

$$A = \int_1^2 P dV$$

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

Таким образом, *работа* – это *функция не только состояния термодинамической системы, но и вида процесса*, который происходит. Поэтому *работа не является однозначной функцией состояния*

(такой, как внутренняя энергия). Из первого начала термодинамики следует, что **теплота Q** , так же как и работа A , является функцией процесса, который происходит с системой.

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

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

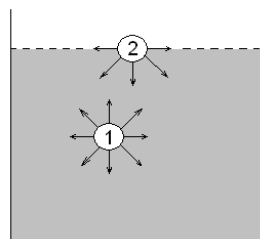


Рис. 17

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Лекция №6 (2 часа)

Тема: Основы термодинамики биологических процессов

1.6.1 Вопросы лекции:

1. Живой организм, как открытая термодинамическая система. Первое начало термодинамики в биологии.
2. Превращение энергии в биологических системах и энергетический баланс живого организма. Теплопродукция. Аккумулирование энергии в молекулах АТФ. Перенос тепла в живых организмах.
3. Понятие энтропии. Закон необратимости энтропии.

1.6.2 Краткое содержание вопросов

1. Живой организм, как открытая термодинамическая система. Первое начало термодинамики в биологии.

Термодинамика является разделом физики, в котором изучают энергию, её передачу из одного места в другое и преобразование из одной формы в другую. Термодинамика основана на наиболее общих принципах, которые являются универсальными и базируются на опытных данных многих наук.

Одним из основных специфических свойств живых существ является их способность превращать и хранить энергию в различных формах. Все биологические объекты для поддержания жизни требуют поступления энергии. Все биологические процессы связаны с передачей энергии. Растения способны получаемую ими энергию солнца накапливать в процессе фотосинтеза в форме энергии химических связей органических

веществ. Животные используют энергию химических связей органических веществ, получаемых с пищей. Все процессы превращения энергии в растениях и животных происходят в пределах ограничений термодинамических принципов. Основные принципы термодинамики универсальны для живой и неживой природы. *Кстати, если ваш питомец приболел - не забудьте сводить его ветеринарную клинику.* Термодинамика использует понятие системы. Любая совокупность изучаемых объектов может быть названа **термодинамической системой**. Примерами систем могут служить клетка, сердце, организм, биосфера

и

т.п.

Существует три вида термодинамических систем в зависимости от их взаимодействия с окружающей средой:

Изолированные системы не обмениваются с внешней средой ни энергией, ни веществом. Таких систем в реальных условиях не существует, но понятие изолированной системы используют для понимания главных термодинамических принципов.

Закрытые системы обмениваются со средой энергией, но не веществом. Примером такой системы может служить закрытый термос с налитым в него чаем.

Открытые системы обмениваются с внешней средой как энергией, так и веществом. Все живые существа относятся к открытым термодинамическим системам.

Классическая термодинамика не рассматривает поведение отдельных атомов и молекул, а стремится описать состояние термодинамических систем с помощью макроскопических переменных величин, которые называются *параметрами состояния*. Такими параметрами являются температура, объем, давление, химический состав, концентрация и т.п., то есть такие физические величины, с помощью которых можно описать состояние конкретной термодинамической системы в данное время.

Термодинамическое равновесие

Термодинамическое равновесие является состоянием системы, в котором параметры состояния не изменяются во времени. Это полностью стабильное состояние, в котором система может находиться в течение неограниченного периода времени. Если изолированная система выведена из равновесия, она стремится возвратиться к этому состоянию самопроизвольно.

Например, если в термос, заполненный горячей водой, температура которой в каждой точке одинакова, бросить кусочек льда, то температурное равновесие нарушится и появится различие температур в объеме жидкости. Известно, что передача тепла будет происходить из области с более высокой температуры в область с более низкой температурой, пока постепенно во всем объеме жидкости не установится одинаковая температура. Таким образом, разница температур исчезнет, и равновесие восстановится. Другим примером является концентрационное равновесие. Предположим, что в изолированной системе существует различие концентрации некоторого вещества. Оно вызывает перемещение вещества, которое продолжается до тех пор, пока не установится состояние равновесия, при котором концентрация вещества в пределах всей системы будет одинаковой.

2. Превращение энергии в биологических системах и энергетический баланс живого организма. Теплопродукция. Аккумуляция энергии в молекулах АТФ. Перенос тепла в живых организмах.

Для понимания термодинамических принципов очень важными являются понятия энергии, работы и теплоты.

Энергия в широком значении - способность системы выполнять некоторую работу. Существует механическая, электрическая, химическая энергия и т.п.

Внутренняя энергия системы - сумма кинетической и потенциальной энергии всех молекул, составляющих систему. Величина внутренней энергии газа зависит от его температуры и числа атомов в молекуле газа. В одноатомных газах (например, гелий) внутренняя энергия является действительно суммой кинетической энергии молекул. В полиатомных газовых молекулах атомы могут вращаться и вибрировать. Такая молекула будет обладать дополнительной кинетической энергией.

В твердых веществах и жидкостях взаимодействие между молекулами также способствует увеличению внутренней энергии. **Общая энергия системы** складывается из её внутренней энергии и кинетической и потенциальной энергии системы, взятой в целом. Величина внутренней энергии зависит от параметров состояния термодинамической системы. Абсолютная величина внутренней энергии не может быть определена, но физический смысл имеет *изменение* внутренней энергии, которое может быть измерено.

Энергия может накапливаться и отдаваться системой. Она может передаваться от одной системы к другой. Есть две формы передачи энергии: **работа и теплота**. Эти величины не являются параметрами состояния системы, так как зависят от пути процесса, в ходе которого изменяется энергия системы. **Теплота** является энергией, переданной от одной системы другой из-за разницы их температур. Есть несколько путей теплопередачи: *теплопроводность, конвекция и излучение*. *Теплопроводность* - процесс теплопередачи между объектами при их непосредственном контакте. Процесс происходит из-за столкновения молекул, в результате чего они передают избыточную энергию друг другу.

Конвекция - это процесс теплопередачи с одного объекта на другой движением жидкости или газа. Как электропроводность, так и конвекция требуют присутствия некоторого вещества. Однако теплота может передаваться и через вакуум. Примером этому служит передача солнечной энергии через космическое пространство к Земле. Этот процесс называется *излучением*, при котором теплота передаётся электромагнитными волнами разной длины волны. Другой формой передачи энергии от одной термодинамической системы другой является **работа**, которая совершается над системой при действии определённых сил или в самой системе. Путь совершения работы может быть различным. Например, газ в цилиндре может быть сжат поршнем или совершать расширение против сил давления поршня; жидкость может быть приведена в движение, а по твёрдому телу можно колотить молотом.

В биологических системах совершаются различные формы работы: механическая работа, выполняемая против механических сил; осмотическая работа, состоящая в транспорте различных веществ благодаря разности их концентраций; электрическая работа, заключающаяся в ионном транспорте в электрическом поле и т.п.

Первый закон термодинамики

Первый закон термодинамики является законом сохранения энергии. Он указывает, что общая энергия в изолированной системе - величина постоянная и не изменяется во времени, а лишь переходит из одной формы другую. Когда в системе происходит некоторый процесс, сумма всей энергии, переданной через границу системы (теплотой или работой), равна общему изменению энергии этой системы. Первый закон термодинамики связывает изменение внутренней энергии системы dU , теплоту ΔQ , переданную системе, и работу ΔA , совершённую системой: $\Delta Q = \Delta U + \Delta A$ (1). Это уравнение является математическим выражением первого закона термодинамики. При передаче теплоты в систему ΔQ положительно (при передаче теплоты системой ΔQ отрицательно). Работа, совершённая системой считается положительной (работа, совершённая над системой - отрицательная). Смысл первого закона термодинамики можно понять, используя в качестве простого примера газ, закрытый в цилиндре с установленным подвижным поршнем. Если мы добавляем теплоту к газу, но не допускаем перемещения поршня, внутренняя энергия и, следовательно, температура газа возрастёт. Внутренняя энергия газа может быть повышена при его сжатии поршнем. Если при нагревании газа мы позволяем ему расширяться (не удерживаем поршень), теплота, которую мы сообщаем газу, частично расходуется на увеличение его внутренней энергии, а частично - на совершение внешней работы, в результате которой поршень будет подниматься.

Первый закон термодинамики живых организмов

В 19 столетии было доказано экспериментально, что первый закон термодинамики применим к процессам, которые происходят в биологических системах. Поступление пищи обеспечивает энергию, которая используется для выполнения различных функций организма или сохраняется для последующего использования. Энергия высвобождается из пищевых продуктов в процессе их биологического окисления, которое является многоступенчатым процессом. Энергия пищевых продуктов используется в клетках первоначально для синтеза макроэргических соединений - например, аденозинтрифосфорной кислоты (АТФ). АТФ, в свою очередь, может использоваться как источник энергии почти для всех процессов в клетке. Пищевые вещества окисляются вплоть до конечных продуктов, которые выделяются из организма. Например, углеводы окисляются в организме до углекислого газа и воды. Такие же конечные продукты образуются при сжигании углеводов в калориметре:



Величина энергии, высвобождаемой из каждого грамма глюкозы в этой реакции, составляет 4,1 килокалории (*кКал*). Столько же энергии, образуется при окислении глюкозы в живых клетках, несмотря на то, что процесс окисления в них является многоступенчатым процессом и происходит в несколько стадий. Этот вывод основан **на принципе Гесса**, который является следствием первого закона термодинамики: тепловой эффект многоступенчатого химического процесса не зависит от его промежуточных этапов, а определяется лишь начальным и конечным состояниями системы.

Таким образом, исследования с помощью калориметра показали среднюю величину физиологически доступной энергии, которая содержится в *1грамме* трех пищевых продуктов (в килокалориях): углеводы - 4,1; белки - 4,1; жиры - 9,3.

С другой стороны, в конечном итоге вся энергия, поступившая в организм, превращается в теплоту. Также при образовании АТФ лишь часть энергии запасается, большая - рассеивается в форме тепла. При использовании энергии АТФ функциональными системами организма большая часть этой энергии также переходит в тепловую.

Оставшаяся часть энергии в клетках идёт на выполнении ими функции, однако, в конечном счёте, превращается в теплоту. Например, энергия, используемая мышечными клетками, расходуется на преодоление вязкости мышцы и других тканей. Вязкое перемещение вызывает трение, что приводит к образованию тепла.

Другим примером является расход энергии, передаваемой сокращающимся сердцем крови. При течении крови по сосудам вся энергия превращается в тепло вследствие трения между слоями крови и между кровью и стенками сосудов.

Следовательно, по существу вся энергия, потраченная организмом, в конечном счете, преобразуется в теплоту. Из этого принципа существует лишь единственное исключение: в случае, когда мышцы выполняют работу над внешними телами.

Если человек не выполняет внешней работы, то уровень высвобождения организмом энергии можно определить по величине общего количества теплоты, выделенной телом. Для этого применяют метод **прямой калориметрии**, для реализации которого используют большой, специально оборудованный *калориметр*. Организм помещают в специальную камеру, которая хорошо изолирована от среды, то есть не происходит обмена энергией с окружающей камеру средой. Количество теплоты, выделенной исследуемым организмом, можно точно измерить. Эксперименты, выполненные этим методом, показали, что количество энергии, поступающей в организм, равно энергии, выделяющейся при проведении калориметрии.

Прямая калориметрия в проведении трудоёмка, поэтому в настоящее время используют метод *непрямой калориметрии*, который основан на вычислении энергетического выхода организма по использованию им кислорода.

Второй закон термодинамики

Первый закон термодинамики утверждает только о сохранении энергии, но не указывает направления, в котором могут осуществляться термодинамические процессы. Возможное направление термодинамических процессов является предметом второго закона термодинамики.

Второй закон термодинамики указывает, что все реальные процессы (в том числе в биологических системах), сопровождаются рассеянием некоторой части энергии в теплоту. Все формы энергии (механическая, химическая, электрическая и т.п.) могут быть превращены в теплоту без остатка. Но сама теплота не может превращаться полностью в другие формы энергии. Не существует двигателя или процесса, который бы преобразовывал теплоту в другую форму энергии с 100% эффективностью. Как известно, рассеяние теплоты означает энергетическое разложение. Теплота - деградированная форма энергии, поскольку термическое движение молекул беспорядочный и вероятностный процесс. Таким образом, энергетическое рассеивание в форме теплоты необратимо.

Согласно второму закону термодинамики, каждый реальный процесс, происходящий в термодинамической системе, может осуществляться только в одном направлении. Противоположный процесс, при котором как система, так и окружающая среда возвращались бы в их первоначальные состояния, невозможен. Одна из формулировок второго закона термодинамики (Клаузиуса) указывает, что *теплота не может*

передаваться самопроизвольно от тела, обладающего более низкой температурой, телу с более высокой температурой.

Любой реальный процесс является в той или иной мере необратимым.

3. Понятие энтропии. Закон необратимости энтропии.

Направление спонтанных процессов в изолированных системах характеризуется параметром состояния, который называется *энтропией* (из греч. "преобразование"). Изменение энтропии системы dS определяется отношением теплоты dQ , введенной в систему или выведенной из системы, к абсолютной температуре T системы, при которой этот процесс происходит: $dS = dQ/T$ (2). Энтропия изолированной системы возрастает, если система стремится в состояние равновесия, и достигает своей максимальной величины в этом состоянии. Энтропия возрастает во всех реальных термодинамических процессах.

Энтропия системы имеет тесное отношение к показателю упорядоченности или беспорядка составляющих системы. Согласно принципу Больцмана, энтропия системы S в данном состоянии пропорциональна термодинамической вероятности W этого состояния:

$$S = k \ln W \quad (3), \quad \text{где } k - \text{константа Больцмана.}$$

Термодинамическая вероятность является числом микросостояний системы, посредством которых реализуется данное макросостояние системы. Чем больше возможно микросостояний (вариантов расположения частиц), тем более неупорядочена система, тем больше - величины W и S . Каждая система стремится к переходу из менее вероятного высокоупорядоченного состояния в статистически более вероятные состояния, характеризующиеся беспорядочным расположением молекул. Можно сказать, что каждая система характеризуется тенденцией самопроизвольного перехода к состоянию максимального молекулярного беспорядка или хаоса.

Термодинамический потенциал

Состояние каждой термодинамической системы может полностью определяться с помощью термодинамических потенциалов. Каждому из них приписывается определенный набор независимых параметров состояния. Кроме упомянутой выше *внутренней энергии* U , к термодинамическим потенциалам относят: *энтальпию* H , *свободную энергию Гельмгольца* F , *свободную энергию Гиббса* G . Они могут быть определены с помощью формул, где P - давление, V - объем, S - энтропия и T - температура.

$$H = U + PV \quad (4)$$

$$F = U - TS \quad (5)$$

$$G = U + PV - TS \quad (6)$$

Свободная энергия Гиббса соответствует состоянию системы, при котором давление и температура являются постоянными. Поэтому этот термодинамический потенциал употребляют для описания биологических систем. Полезная работа в таких системах выполняется за счет уменьшения потенциала Гиббса.

Величина свободной энергии Гиббса, приходящейся на один ион вещества, называется *электрохимическим потенциалом*, который включает химическую, осмотическую и электрическую составляющие энергии:

$$\mu = \mu_0 + RT \ln C + zF\phi \quad (7)$$

здесь μ_0 - стандартный электрохимический потенциал, зависящий от химической природы вещества; C - концентрация вещества, R - универсальная газовая постоянная, T - термодинамическая температура, z - электрический заряд частицы, F - константа Фарадея, ϕ - электрический потенциал.

Электрохимический потенциал натрия, калия и некоторых других веществ играет решающую роль в таком важном процессе как перенос веществ в мембранах клеток.

Термодинамика неравновесных процессов

Термодинамика равновесных систем основана на принципах, которые в известной мере идеализируются. Биологические объекты не находятся в состоянии равновесия. Процессы, проходящие в таких системах, являются необратимыми. *Термодинамика неравновесных процессов* основана на таких принципах и понятиях как линейные соотношения, производство энтропии, стационарное состояние, теорема Пригожина.

Тема: Электростатика.Емкость.Законы постоянного тока

1.7.1 Вопросы лекции:

1. Электростатическое поле (СЭП), его напряженность. Поток напряженности, теорема Гаусса
2. Работа по перемещению электрического заряда в СЭП. Потенциал. Напряженность поля, как градиент потенциала.
3. Электронная теория тока в металлах. Закон Ома в дифференциальном виде.
4. Емкость проводника. Конденсаторы. Емкость клеточных мембран. Энергия СЭП.

1.7.2 Краткое содержание вопросов

1. Электростатическое поле (СЭП), его напряженность. Поток напряженности, теорема Гаусса

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).

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

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

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

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

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

В векторной форме закон Кулона:

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

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

Данная запись закона Кулона позволяет определить направление силы.

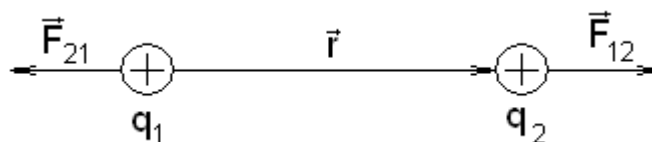


Рис. 1 – Взаимодействие зарядов

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

Взаимодействие зарядов осуществляется посредством электрических полей, окружающих заряды.

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

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

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

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

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

Напряженность является векторной, силовой характеристикой электростатического поля.

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

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

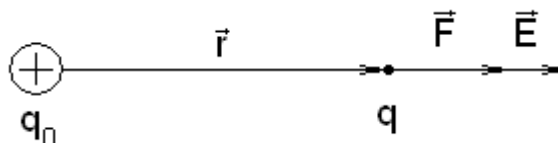


Рис. 2 – Направление вектора напряженности

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

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

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

Потенциал является скалярной, энергетической характеристикой электростатического поля.

Потенциал в СИ измеряется в Вольтах (В)

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

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:

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

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

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

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

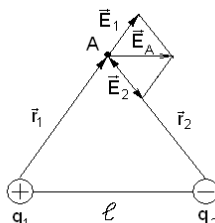


Рис. 3 – Электростатическое поле, созданное двумя зарядами

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

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

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

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

Напряженность поля диполя равна векторной сумме напряженностей полей, созданных положительными $q_1 (E_+)$ и отрицательными зарядами $q_2 (E_-)$

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

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

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

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

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

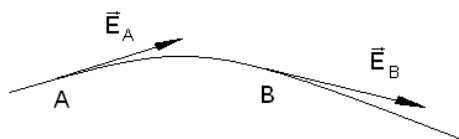


Рис. 4 – Силовые линии электростатического поля

Силовые линии имеют особенности:

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

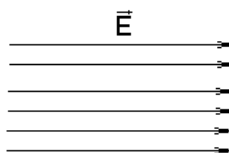


Рис. 5 – Однородное электростатическое поле

Примеры графического изображения электростатических полей.

1. Поле точечного заряда.

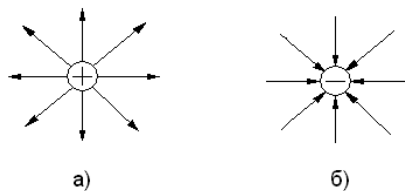


Рис. 6 – а) поле точечного положительного заряда
б) поле точечного отрицательного заряда

2. Поле двух разноименных зарядов.

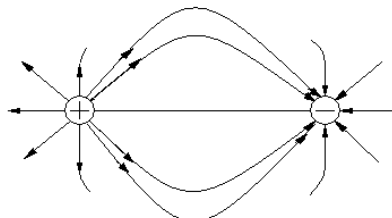


Рис. 7 – Графическое изображение электростатического поля диполя

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

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

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

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

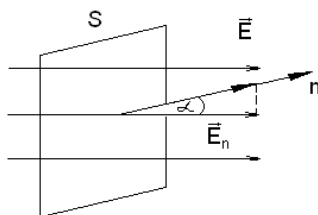


Рис. 8 – Поток вектора напряженности

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

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

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

Тогда полный поток равен:

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

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

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

2. Работа по перемещению электрического заряда в СЭП. Потенциал. Напряженность поля, как градиент потенциала.

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

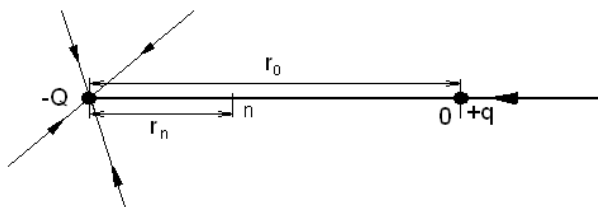


Рис. 11 – Работа перемещения точечного положительного заряда

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

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

где r – переменное расстояние между зарядами.

По определению:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Подставим формулу (1.21) в (1.19):

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

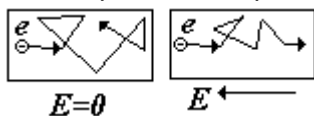
Если в качестве заряда, переносимого в электростатическом поле взять единичный положительный заряд, то элементарная работа сил поля на пути dl равна $A = Edl \cos \alpha = E_l dl$, где $E_l = E \cos \alpha$ – проекция вектора напряженности на направление элементарного перемещения. В итоге получим:

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

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

3. Электронная теория тока в металлах. Закон Ома в дифференциальном виде.

В электронной теории проводимости предполагается:



1) В металлах имеются свободные электроны, которые в отсутствие внешнего электрического поля движутся хаотически, а при наличии поля приобретают характер упорядоченного движения (см. рис.).

2) Движение каждого электрона подчиняется законам классической механики.

3) Все вместе электроны образуют электронный газ и подчиняются законам молекулярной физики.

4) Взаимодействие электронов с ионами решетки рассматривается как простое столкновение, взаимодействием электронов между собой пренебрегается.

5) Напряженность поля внутри металла считается постоянной.

6) Все электроны под действием внешнего электрического поля приобретают одинаковые скорости v_{cp} .

При выводе закона Ома будем считать, что электрон, сталкиваясь с ионом, полностью отдает ему свою энергию, а затем снова набирает скорость под действием сил поля (см. рис. – фрагмент кристаллической решетки). Электрон в кристалле участвует одновременно в двух движениях: хаотическом тепловом со скоростью $u \sim 10^5$ м/с и направленном под действием поля со скоростью v_{cp} порядка 0,001 м/с, т.е. $u \gg v_{cp}$

$ma = F = eE$	II закон Ньютона для электрона	
$v_{max} = at$	из кинематики, t – время движения электрона между двумя столкновениями	
$v_{cp} = \frac{0 + v_{max}}{2}$	средняя скорость электрона за время между двумя столкновениями	
$t = \frac{\lambda}{v_{cp} + u} \cong \frac{\lambda}{u}$	l – средняя длина свободного пробега электрона – это расстояние, которое проходит электрон между двумя последовательными столкновениями с ионами ($u \gg v_{cp}$)	
$j = e \cdot v_{cp} \cdot n$ (·)	плотность тока в проводнике; подставив в эту формулу	

	вышеприведенные, получим:	
$\vec{j} = e \frac{at}{2} n = e \frac{eE}{2m} \cdot \frac{\lambda}{u} n = \frac{e^2 n \lambda}{2m u} E$	мы получили закон Ома в дифференциальной форме, запишем его в векторном виде:	

$\vec{j} = \sigma \vec{E} = \frac{1}{\rho} \vec{E}$	закон Ома в дифференциальной форме. В такой форме закон применим для бесконечно малого объема проводника, фактически – для точки проводника.	
$\sigma = \frac{e^2 n \lambda}{2m u} (\dots)$	$\sigma = \frac{1}{\rho}$	s - удельная электропроводность проводника; r - удельное сопротивление проводника

Электронная теория проводимости металлов, несмотря на множество упрощающих предположений, позволяет теоретически вывести закон Ома и закон Джоуля – Ленца (см. ниже). Это свидетельствует о том, что модель поведения электронов в металле соответствует действительности. Вместе с тем эта теория столкнулась с рядом трудностей. Рассмотрим некоторые из них.

1) Теплоемкость металла теоретически должно складываться из теплоемкости кристаллической решетки и теплоемкости электронов: $C_{Me} = C_{реш} + C_{элект} = 6R/2 + 3R/2$ (для моля). Но из опыта следует, что теплоемкость почти всех твердых тел равна $3R$. Таким образом, получается, что электроны не участвуют в теплоемкости, т.е. не «принимают» тепло при нагревании вещества. В дальнейшем с развитием квантовой механики выяснилось, что электроны в металле могут иметь не любые энергии, а только те, значения которых лежат в разрешенных зонах

4. Электроемкость проводника. Конденсаторы. Электроемкость клеточных мембран. Энергия СЭП.

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:

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

где C – коэффициент пропорциональности, называемый электроемкостью 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.

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

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

$$F = \text{Кл/В}$$

Емкостью в 1 Ф обладает уединенный проводящий шар радиусом в $9 \cdot 10^6$ км. Это достаточно большая электроемкость, поэтому на практике используют $1 \text{ мкФ} = 10^{-6} \text{ Ф}$, $1 \text{ пФ} = 10^{-12} \text{ Ф}$, 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*.

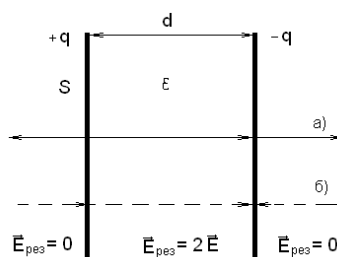


Рис. 16 – Плоский конденсатор

- 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.

Емкость плоского конденсатора:

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

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

Лекция №8 (2 часа)

Тема: Электрические явления в биологических системах.

1.8.1 Вопросы лекции:

1. Механизм образования биопотенциалов.
2. Биопотенциалы покоя и действия.
3. Измерение биопотенциалов. Физические основы электрокардиографии.

1.8.2 Краткое содержание вопросов

1. Механизм образования биопотенциалов.

Электрический потенциал. Чтобы переместить заряд против действующей на него электрической силы необходимо выполнить работу. Эта работа не зависит от пути перемещения заряда в электрическом поле, но зависит от начального и конечного положения заряда.

Если заряд перемещается из одной точки в другую против электрической силы, его потенциальная электростатическая энергия увеличивается. Электрический потенциал в любой точке равен электростатической потенциальной энергии W_p , которую имеет положительный заряд q в этой точке: $\phi = W_p/q$ (4).

Можно также сказать, что электрический потенциал в точке равен работе, которую необходимо совершить против электрических сил, чтобы переместить положительный заряд из данной точки на большое расстояние, где потенциал электрического поля равен нулю. Электрический потенциал является скалярной величиной и измеряется в вольтах (В).

Напряжённость электрического поля является отрицательным градиентом электрического потенциала - показателя изменения потенциала с расстоянием x : $E \rightarrow = - d\phi/dx$. С помощью приборов можно измерить разность потенциалов, но не напряжённость поля. Последняя может быть вычислена, если использовать зависимость между $E \rightarrow$ и $\Delta\phi$: где $\Delta\phi = E \cdot l$ - расстояние между двумя токами электрического поля.

Мембранный потенциал покоя

Каждая клетка превращает часть своей метаболической энергии в электростатическую энергию. Источником электрического поля клетки является плазматическая мембрана. Существует разность потенциалов между внутренней и внешней поверхностями плазматической мембраны. Эта разность потенциалов называется **мембранным потенциалом**.

Разность потенциалов между внутренней и внешней средами клетки может измеряться непосредственно и довольно точно. Для этого используют микроэлектрод, представляющий собой стеклянную микропипетку с диаметром кончика до 1 мкм, заполненную концентрированным раствором KCl. Микроэлектрод

подключают к усилителю напряжения регистрирующего устройства. Можно измерять мембранный потенциал мышечных, нервных клеток или клеток других тканей. Другой электрод (референтный) установлен на поверхности ткани.

Когда кончик микроэлектрода находится вне клетки, его потенциал по отношению к референтному электроду равен нулю. Если конец электрода погружают в клетку, прокалывая плазматическую мембрану, разность потенциалов резко становится отрицательной. На шкале измерительного устройства регистрируется разность потенциалов между внутренней и внешней средами клетки. Эта разность потенциалов называется **трансмембранной, или мембранным потенциалом**.

Если клетка находится в состоянии покоя, её мембранный потенциал имеет отрицательное значение и устойчивую величину. Обычно его называют **мембранным потенциалом покоя**. Мембранный потенциал покоя клеток различных тканей составляет от - 55 милливольт (мВ) до -100 мВ.

При определенных физиологических условиях могут происходить изменения мембранного потенциала. Изменения его в положительном направлении называется **деполяризацией** плазматической мембраны. Смещение мембранного потенциала в отрицательном направлении называется **гиперполяризацией**.

2. Биопотенциалы покоя и действия.

Электрические явления в плазматической мембране определяются распределением ионов между внутренней и внешней сторонами мембраны. Из химического анализа известно, что концентрация ионов внутриклеточной жидкости сильно отличается от концентрации ионов во внеклеточной жидкости. Термин "внеклеточная жидкость" имеет отношение ко всем жидкостям вне клеток (межклеточное вещество, кровь, лимфа и т.п.). В таблице представлены концентрации основных ионов в мышечных клетках млекопитающих и внеклеточной жидкости (миллимоли на литр).

Вид ионов		Внутриклеточная концентрация	Внеклеточная концентрация
Катионы	Натрий (Na^+)	12	145
	Калий (K^+)	155	4
	Другие	-	5
Анионы	Хлор (Cl^-)	4	120
	Бикарбонат (HCO_3^-)	8	27
	Другие (A^-)	155	7

Существуют значительные различия между концентрацией основных ионов внутри и вне клетки. Внеклеточная жидкость имеет высокую концентрацию ионов натрия и хлора. Внутриклеточная жидкость имеет высокую концентрацию калия и различных органических анионов (A^-) (заряженные группы белков).

Различие между концентрациями натрия и калия во внеклеточной и внутриклеточной жидкостях обусловлены деятельностью натрий-калиевого насоса, который выкачивает за один цикл 3 иона натрия из клетки и закачивает 2 иона калия в клетку против электрохимического градиента указанных ионов. Основная функция натрий-калия насоса - поддержание различия концентраций ионов натрия и калия по обе стороны плазматической мембраны.

В состоянии покоя проницаемость плазматической мембраны для ионов калия значительно превышает проницаемость мембраны для ионов натрия. В нервных клетках соотношения проницаемости соответствующих ионов составляет 1:0,04.

Этот факт дает возможность объяснять существование мембранного потенциала покоя.

Ионы калия стремятся покинуть клетку из-за их высокой внутренней концентрации. При этом перемещения через мембрану внутриклеточных анионов из-за их больших размеров не происходит. Незначительное поступление ионов натрия внутрь клетки также не компенсирует выход ионов калия наружу, так как проницаемость мембраны в покое для ионов натрия мала.

Следовательно, снаружи клетка приобретает дополнительно положительный заряд и внутри остаётся избыток отрицательного заряда.

Диффузия калия через мембрану - процесс ограниченный. Ионы калия, проникающие через мембрану, создают электрическое поле, которое задерживает диффузию других ионов калия. По мере выхода из клетки калия электрическое поле нарастает и, в конечном итоге, напряжённость достигает такого значения, когда поток калия через мембрану прекращается. Состояние, при котором поток ионов по их концентрационному градиенту уравнивается мембранным потенциалом, называется *состоянием электрохимического равновесия* ионов. Величина такого мембранного потенциала равновесия определяется *уравнением Нернста* (при этом считают, что мембрана проницаема только для одного вида ионов):

$$\varphi_m = -\frac{R \cdot T}{z \cdot F} \cdot \ln \frac{[K^+]_i}{[K^+]_o} \quad (5)$$

R - универсальная газовая постоянная, T - термодинамическая температура, z - электрический заряд иона, F - постоянная Фарадея, $[K^+]_i$ и $[K^+]_o$ - внутриклеточная и внеклеточная концентрации ионов калия соответственно.

Вычисления, основанные на уравнении Нернста, указывают, что внутренняя и внешняя концентрация иона хлора также соответствует состоянию электрохимического равновесия, но концентрация натрия далека от равновесия с мембранным потенциалом мембраны.

Уравнение Нернста показывает, что концентрационный градиент ионов калия определяет величину мембранного потенциала покоя только в первом приближении. Рассчитанные величины мембранного потенциала совпадают с экспериментально полученными только при высокой концентрации калия вне клетки.

Более точная величина мембранного потенциала покоя может быть вычислена из уравнения Гольдмана-Ходжкина, в котором учитываются концентрации и проницаемость мембраны для трёх основных ионов внутри- и внеклеточной жидкостей:

$$\varphi_m = -\frac{R \cdot T}{z \cdot F} \cdot \ln \frac{P_{Na^+} \cdot [Na^+]_i + P_{K^+} \cdot [K^+]_i + P_{Cl^-} \cdot [Cl^-]_o}{P_{Na^+} \cdot [Na^+]_o + P_{K^+} \cdot [K^+]_o + P_{Cl^-} \cdot [Cl^-]_i} \quad (6)$$

Также в поддержании мембранного потенциала покоя участвует непосредственно натрий-калий насос, выкачивая три иона натрия из клетки и закачивая лишь два иона калия. В результате мембранный потенциал покоя становится более отрицательным, чем был бы, если бы создавался только пассивным перемещением ионов через мембрану.

3. Измерение биопотенциалов. Физические основы электрокардиографии.

Если через мембрану нервной или мышечной клетки проходит кратковременный электрический ток, то мембранный потенциал подвергается последовательным изменениям, которые специфичны и уникальны для

возбудимых клеток. Возбудимые ткани можно стимулировать также механическими или химическими средствами, но в экспериментальной работе, как правило, используются электрические стимулы.

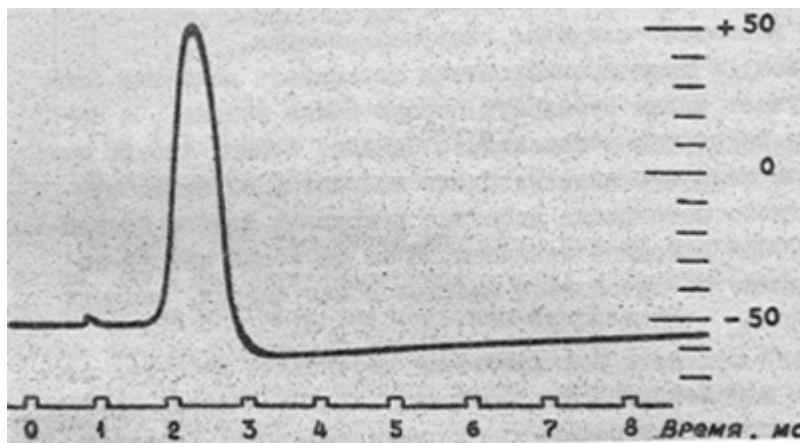


Рис. 1. Потенциал действия нервной клетки.

Потенциал действия - быстрое колебание величины мембранного потенциала, вызванное действием на возбудимую клетку электрического или другого раздражителей.

На рис. 1 показан потенциал действия нервной клетки, записанный с помощью микроэлектрода. Если к клетке прикладывают

кратковременный электрический стимул, мембранный потенциал уменьшается быстро до нуля. Это отклонение характеризуют как *фазу деполяризации*. В течение короткого времени внутренняя среда клетки становится электроположительна по отношению к наружной (*фаза реверсии мембранного потенциала, или овершут*). Затем мембранный потенциал возвращается к уровню мембранного потенциала покоя (*этап реполяризации*) (рис.2.).

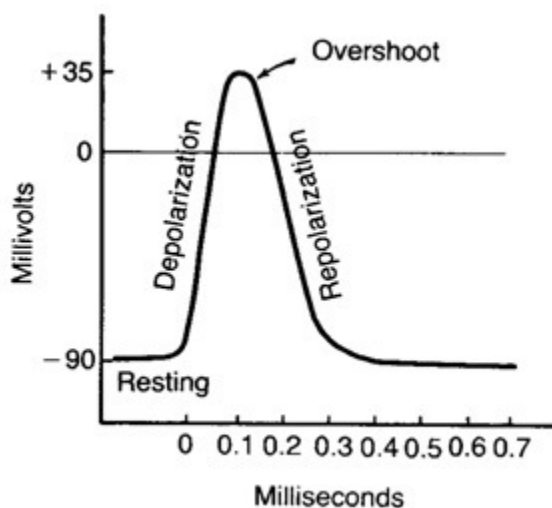


Рис. 2. Фазы потенциала действия

Длительность потенциала действия составляет от 0,5 до 1 миллисекунды в больших нервных клетках и несколько миллисекунд в клетках скелетных мышц. Общая амплитуда - почти 100 - 120 мВ, отклонение от нулевой линии - около 30-50 мВ.

Потенциал действия играет ведущую роль в обработке информации в нервной системе. Он имеет постоянную амплитуду, которая не является вероятностной величиной. Это имеет большое значение в обработке информации нервной системой. Кодирование интенсивности раздражения осуществляется числом потенциалов действия и частотой, с которой потенциалы

действия следуют друг за другом.

Биофизические основы потенциала действия

Потенциал действия возникает из-за специфических изменений ионной проницаемости в плазматической мембране. Английский физиолог Ходжкин показал, что основной механизм потенциала действия состоит в кратковременном и очень специфическом изменении проницаемости мембраны для ионов натрия. Ионы натрия при этом поступают в клетку до момента, пока мембранный потенциал не достигнет потенциала электрохимического равновесия ионов натрия.

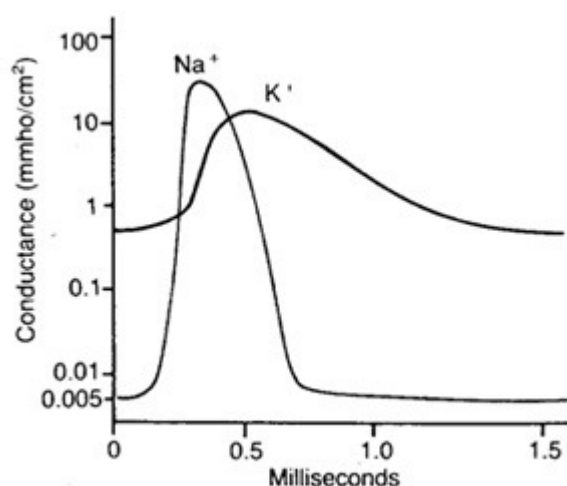


Рис. 3. Изменение проницаемости мембраны для ионов натрия и калия во время потенциала действия

Проницаемость мембраны для натрия при действии на клетку электрического стимула возрастает приблизительно в 500 раз и становится значительно больше, чем проницаемость мембраны для ионов калия. В клетке резко повышается концентрация ионов натрия. В результате мембранный потенциал принимает положительное значение, и поток ионов натрия в

клетку

замедляется.

Во время возникновения потенциала действия происходит деполяризация плазматической мембраны. Быстрая деполяризация мембраны под действием электрического стимула вызывает увеличение её проницаемости для ионов натрия. Возросшее поступление ионов натрия в клетку усиливает деполяризацию мембраны, что, в свою очередь, вызывает дальнейшее увеличение проницаемости мембраны для натрия и т.д.

Но величина мембранного потенциала при деполяризации не достигает уровня потенциала электрохимического равновесия ионов натрия. Причиной этому является снижение проницаемости мембраны для ионов натрия из-за *инактивации натриевого трансмембранного переноса*. Этот процесс резко уменьшает проницаемость мембраны для ионов натрия и останавливает наплыв натрия в клетку.

В этот момент происходит увеличение проницаемости мембраны для ионов калия, что приводит к быстрому снижению величины мембранного потенциала к уровню потенциала покоя. Проницаемость мембраны для ионов калия также снижается до своего нормального значения. Таким образом, инактивация входящего натриевого тока и повышение проницаемости мембраны для ионов калия (выходящий ток) ограничивают длительность потенциала действия и приводят к *реполяризации* мембраны.

Таким образом, в течение потенциала действия некоторое количество ионов натрия поступают в клетку. Но это количество достаточно небольшое. Изменение концентрации ионов в больших нервных клетках составляет лишь около $1/300000$ начальной величины.

Основной механизм изменений проницаемости мембраны обусловлен событиями в натриевых и калиевых каналах мембраны. Состояние их ворот управляется величиной мембранного потенциала. Натриевые каналы имеют два типа ворот. Один из них, называемые активационными воротами закрыты в состоянии покоя и открываются при деполяризации мембраны. Поступление ионов натрия в клетку вызывает открытие всё большего числа активационных ворот. Второй тип ворот натриевых каналов - инактивационные при усиливающейся деполяризации мембраны постепенно закрываются, что останавливает приток натрия в клетку. Деполяризация мембраны также служит причиной открытия дополнительного числа калиевых каналов, в результате чего увеличивается проницаемость мембраны для ионов калия и происходит реполяризация мембраны.

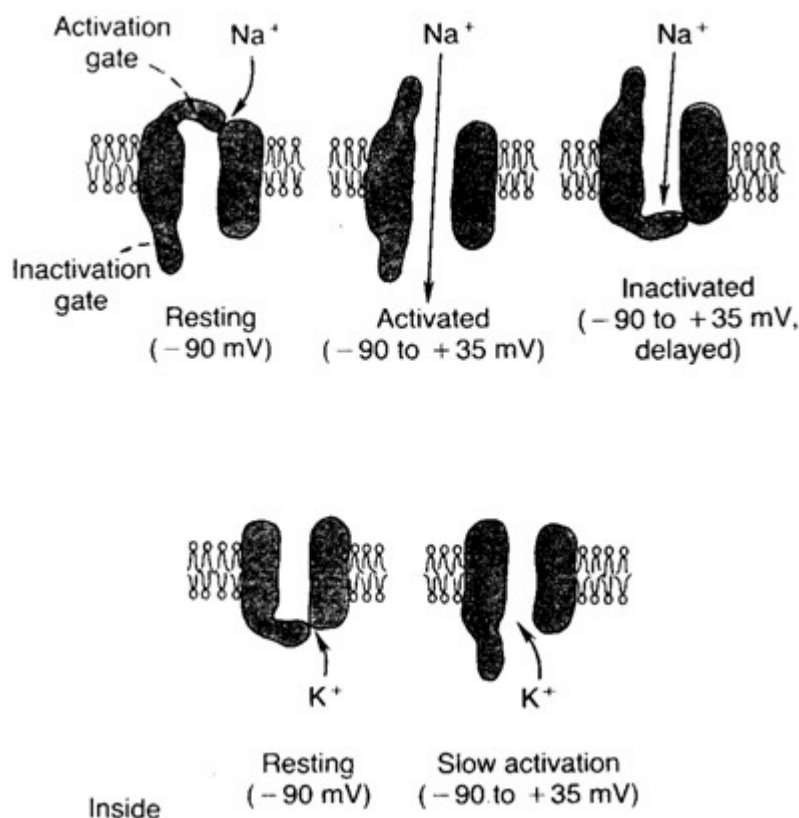


Рис. 4. Изменение состояния натриевых и калиевых каналов мембраны в зависимости от величины мембранного потенциала

Распространение потенциала действия

Потенциал действия распространяется вдоль мембраны нервной и мышечной клеток без уменьшения амплитуды с расстоянием. Этот процесс обусловлен *кабельными свойствами* плазматической мембраны, т.е. способностью проводить электрический ток на небольшие расстояния. Локальный электрический ток течет в клетку в активной области (где возникает потенциал действия) и из клетки - в смежной неактивной зоне. Эти

ионные токи вызывают некоторые изменения мембранного потенциала в зоне, прилегающей к месту возникновения потенциала действия.

Циклический локальный ток снижает заряд мембраны в неактивной зоне и деполяризует её. Если деполяризация достигает порогового уровня, то возрастает проницаемость мембраны для ионов натрия и возникает потенциал действия. Таким образом потенциал действия распространяется вдоль нервных и мышечных волокон с постоянной скоростью.

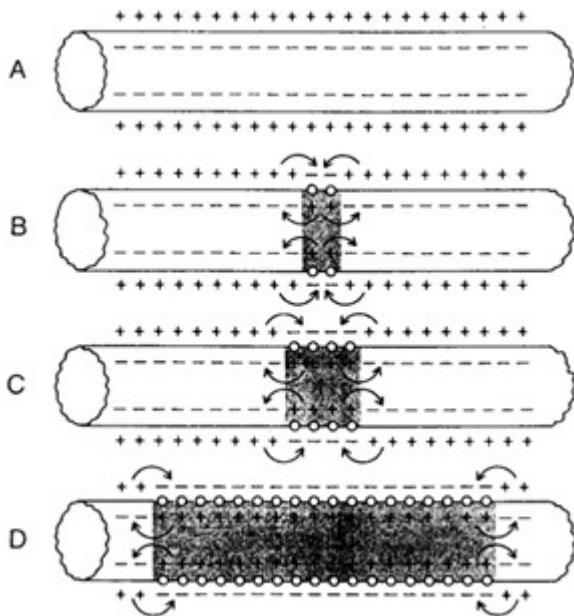


Рис. 5. Распространение потенциала действия вдоль мембраны нервного волокна

Скорость распространения потенциала действия в нервных волокнах зависит от их диаметра. Она максимальна в наиболее толстых волокнах, достигая около 100 метров в секунду.

Лекция №9 (2 часа)

Тема: Магнитное поле тока в вакууме и в веществе. Электромагнитная индукция. Электромагнитные колебания и волны.

1.9.1 Вопросы лекции:

1. Опыты Эрстеда и Ампера. Магнитная индукция.
2. Закон Био-Савара-Лапласа. Магнитное поле прямого тока, кругового тока и бесконечного длинного соленоида.
3. Действие ПМП на проводник с током. Закон Ампера. Сила Лоренца. Движение заряженных частиц в ПМП.
4. Орбитальный магнитный момент атома. Намагничивание вещества. Напряженность ПМП. Относительная магнитная проницаемость. Три типа магнетиков.
5. Опыты Фарадея по электромагнитной индукции. Закон Фарадея и правило Ленца.
6. Самоиндукция и индуктивность контура.
7. Энергия магнитного поля в катушке. Плотность энергии магнитного поля.
8. Колебательный контур Томсона. Формула Томсона для периода колебаний контура. Электромагнитная волна.
9. Законы Максвелла(формулировка) и их опытные обоснования. Перенос энергии волной. Вектор Умова-Пойнтинга.

1.9.2 Краткое содержание вопросов

1. Опыты Эрстеда и Ампера. Магнитная индукция.

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

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

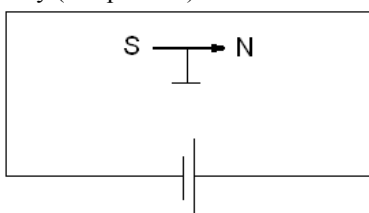


Рис. 27 – Магнитная стрелка вблизи проводника с током

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

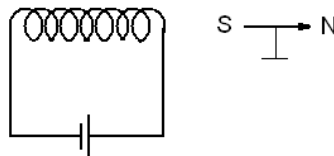


Рис. 28 – Магнитная стрелка вблизи катушки с током

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

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

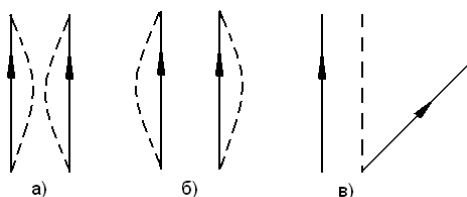


Рис. 29 – Взаимодействие токов

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

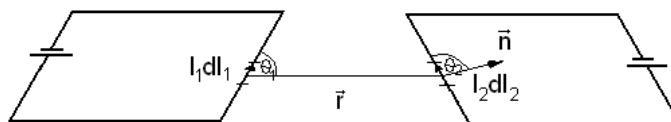


Рис. 30 – «Станок Ампера»

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

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

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

2. Закон Био-Савара-Лапласа. Магнитное поле прямого тока, кругового тока и бесконечно длинного соленоида.

Опыт показывает, что, подобно тому, как в пространстве, окружающем электрические заряды, возникает электростатическое поле, так в пространстве, окружающем токи и постоянные магниты, возникает силовое поле, называемое **магнитным**. Наличие магнитного поля обнаруживается по силовому действию на внесенные в него проводники с током или постоянные магниты. Особенности магнитного поля: действие только на движущиеся в эл. поле заряды. Опыт показывает, что характер воздействия магнитного поля на ток различен в зависимости от формы проводника, по которому течет ток, от расположения проводника и

от направления тока. Следовательно, чтобы охарактеризовать магнитное поле, надо рассмотреть его действие на определенный ток. Подобно тому, как при исследовании электростатического поля использовались точечные заряды, при исследовании магнитного поля используется *замкнутый плоский контур с током (рамка с током)*, размеры которого малы по сравнению с расстоянием до токов, образующих магнитное поле. Ориентация контура в пространстве характеризуется направлением нормали к контуру. В качестве положительного направления нормали принимается направление, связанное с током *правилом правого винта*, т. е. за положительное направление нормали принимается направление поступательного движения винта, головка которого вращается в направлении тока, текущего в рамке (рис. 160).

Опыты показывают, что магнитное поле оказывает на рамку с током ориентирующее действие, поворачивая ее определенным образом. Этот результат связывается с определенным направлением магнитного поля. За направление магнитного поля в данной точке принимается направление, вдоль которого располагается положительная нормаль к рамке (рис. 161). За направление магнитного поля может быть также принято направление, совпадающее с направлением силы, которая действует на северный полюс магнитной стрелки, помещенной в данную точку. Так как оба полюса магнитной стрелки лежат в близких точках поля, то силы, действующие на оба полюса, равны друг другу. Следовательно, на магнитную стрелку действует пара сил, поворачивающая ее так, чтобы ось стрелки, соединяющая южный полюс с северным, совпадала с направлением поля. Рамкой с током можно воспользоваться также и для количественного описания магнитного поля. Так как рамка с током испытывает ориентирующее действие поля, то на нее в магнитном поле действует пара сил. Вращающий момент сил зависит как от свойств поля в данной точке, так и от свойств рамки: $M = [p_m B]$, (109.1) где **B** — **вектор магнитной индукции**, являющейся количественной характеристикой магнитного поля, **p_m** — **вектор магнитного момента рамки** с током. Для плоского контура с током $p_m = ISn$, (109.2) где S — площадь поверхности контура (рамки), **n** — единичный вектор нормали к поверхности рамки. Направление **p_m** совпадает, таким образом, с направлением положительной нормали. Если в данную точку магнитного поля помещать рамки с различными магнитными моментами, то на них действуют различные вращающие моменты, однако отношение M_{max}/p_m (M_{max} — максимальный вращающий момент) для всех контуров одно и то же и поэтому может служить характеристикой магнитного поля, называемой **магнитной индукцией**: $B = M_{max}/p_m$. **Магнитная индукция** в данной точке *однородного* магнитного поля определяется максимальным вращающим моментом, действующим на рамку с магнитным моментом, равным единице, когда нормаль к рамке перпендикулярна направлению поля. Следует отметить, что вектор **B** может быть выведен также из закона Ампера (см. §111) и из выражения для силы Лоренца (см. § 114). Так как магнитное поле является *силовым*, то его, по аналогии с электрическим, изображают с помощью **линий магнитной индукции** — линий, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора **B**. Их направление задается правилом правого винта: головка винта, ввинчиваемого по направлению тока, вращается в направлении линий магнитной индукции.

Линии магнитной индукции можно «проявить» с помощью железных опилок, намагничивающихся в исследуемом поле и ведущих себя подобно маленьким магнитным стрелкам. На рис. 162, а показаны линии магнитной индукции поля кругового тока, на рис. 162, б — линии магнитной индукции поля соленоида (соленоид — равномерно намотанная на цилиндрическую поверхность проволоочная спираль, по которой течет электрический ток).

Линии магнитной индукции всегда *замкнуты* и охватывают проводники с током. Этим они отличаются от линий напряженности электростатического поля, которые являются *разомкнутыми* (начинаются на положительных зарядах и кончаются на отрицательных).

Вектор магнитной индукции **B** характеризует *резльтирующее* магнитное поле, создаваемое всеми *макро- и микротоками*, т. е. при одном и том же токе и прочих равных условиях вектор **B** в *различных* средах будет иметь *разные* значения.

Закон Био — Савара — Лапласа и его применение к расчету магнитного поля

Закон Био — Савара — Лапласа для проводника с током I , элемент которого $d\mathbf{l}$ создает в некоторой точке A (рис. 164) индукцию поля $d\mathbf{B}$, записывается в виде где $d\mathbf{l}$ — вектор, по модулю равный длине $d\mathbf{l}$ элемента проводника и совпадающий по направлению с током, \mathbf{r} — радиус-вектор, проведенный из элемента $d\mathbf{l}$ проводника в точку A поля, r — модуль радиуса-вектора \mathbf{r} . Направление $d\mathbf{B}$ перпендикулярно $d\mathbf{l}$ и \mathbf{r} , т. е. перпендикулярно плоскости, в которой они лежат, и совпадает с касательной к линии магнитной индукции. Это направление может быть найдено по правилу нахождения линий магнитной индукции (правилу правого винта): направление вращения головки винта дает направление $d\mathbf{B}$, если поступательное движение винта соответствует направлению тока в элементе. Модуль вектора $d\mathbf{B}$ определяется выражением где α — угол между векторами $d\mathbf{l}$ и \mathbf{r} . Для магнитного поля, как и для электрического, справедлив **принцип суперпозиции**: магнитная индукция результирующего поля, создаваемого несколькими токами или движущимися зарядами, равна векторной сумме магнитных индукций складываемых полей, создаваемых каждым током или движущимся зарядом в отдельности: Расчет характеристик магнитного поля (\mathbf{B} и \mathbf{H}) по приведенным формулам в общем случае довольно сложен. Однако если распределение тока имеет определенную симметрию, то применение закона Био — Савара — Лапласа совместно с принципом суперпозиции позволяет довольно просто рассчитать конкретные поля. Рассмотрим два примера.

1. Магнитное поле прямого тока — тока, текущего по тонкому прямому проводу бесконечной длины (рис. 165). В произвольной точке A , удаленной от оси проводника на расстояние R , векторы $d\mathbf{B}$ от всех элементов тока имеют одинаковое направление, перпендикулярное плоскости чертежа («к нам»). Поэтому сложение векторов $d\mathbf{B}$ можно заменить сложением их модулей. В качестве постоянной интегрирования выберем угол α (угол между векторами $d\mathbf{l}$ и \mathbf{r}), выразив через него все остальные величины. Как следует из рисунка, все элементы кругового проводника с током создают в центре магнитное поле одинакового направления — вдоль нормали от витка. Поэтому сложение векторов $d\mathbf{B}$ можно заменить сложением их модулей. Так как все элементы проводника перпендикулярны радиус-вектору ($\sin\alpha=1$) и расстояние всех элементов проводника до центра кругового тока одинаково и равно R , то, согласно (110.2), Тогда Следовательно, магнитная индукция поля в центре кругового проводника с током.

Закон Ампера применяется для определения силы взаимодействия двух токов. Рассмотрим два бесконечных прямолинейных параллельных тока I_1 и I_2 (направления токов указаны на рис. 167), расстояние между которыми равно R . Каждый из проводников создает магнитное поле, которое действует по закону Ампера на другой проводник с током. Рассмотрим, с какой силой действует магнитное поле тока I_1 на элемент $d\mathbf{l}$ второго проводника с током I_2 . Ток I_1 создает вокруг себя магнитное поле, линии магнитной индукции которого представляют собой концентрические окружности. Направление вектора \mathbf{B}_1 задается правилом правого винта, его модуль по формуле (110.5) равен Направление силы $d\mathbf{F}_1$, с которой поле \mathbf{B}_1 действует на участок $d\mathbf{l}$ второго тока, определяется по правилу левой руки и указано на рисунке. Модуль силы, согласно (111.2), с учетом того, что угол α между элементами тока I_2 и вектором \mathbf{B}_1 прямой, равен $dF_1 = I_2 B_1 d\mathbf{l}$, или, подставляя значение для B_1 , получим Рассуждая аналогично, можно показать, что сила $d\mathbf{F}_2$, с которой магнитное поле тока I_2 действует на элемент $d\mathbf{l}$ первого проводника с током I_1 , направлена в противоположную сторону и по модулю равна Сравнение выражений (111.3) и (111.4) показывает, что $d\mathbf{F}_1 = d\mathbf{F}_2$, т. е. два параллельных тока одинакового направления притягиваются друг к другу с силой.

3. Действие ПМП на проводник с током. Закон Ампера. Сила Лоренца. Движение заряженных частиц в ПМП.

Рассмотрим проводник с током и поместим рядом с ним пробный элемент тока $I d\mathbf{l}$ (см. рис. 31). На данный элемент тока будет оказываться силовое воздействие, причем $d\mathbf{F} \sim I d\mathbf{l}$.

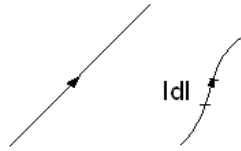


Рис. 31 – Проводник с током и пробный элемент тока

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

где θ – угол между направлением \vec{B} и участком длины \vec{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:

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

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

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

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

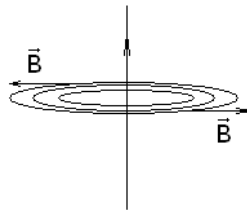


Рис. 32 – Магнитное поле прямого тока

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

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

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

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

$$dF = I B d\ell \sin \theta, \quad (3.7)$$

где $\angle \theta = (d\ell \hat{B})$

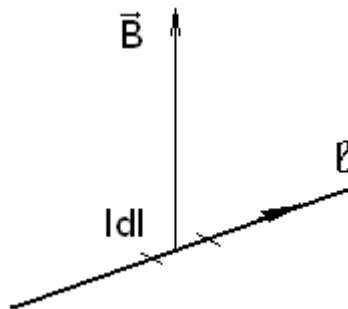


Рис. 34 – Проводник с током в магнитном поле

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

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

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

$$F_A = I\ell B \sin \theta \quad (3.8)$$

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

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

Чтобы определить направление силы Ампера применяют правило левой руки.

Правило левой руки:

1. Линии магнитной индукции B входят в левую ладонь;
2. Четыре пальца располагаются по направлению тока;
3. Большой отогнутый палец указывает направление силы F .

Применим данное правило к рисунку 34.

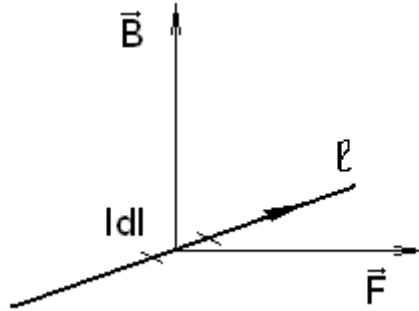


Рис. 35 – Действие силы F на проводник с током

4. Орбитальный магнитный момент атома. Намагничивание вещества. Напряженность ПМП. Относительная магнитная проницаемость. Три типа магнетиков.

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).

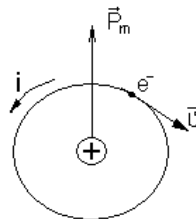
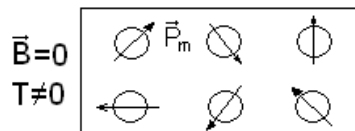


Рис. 48 – Молекулярный ток

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.

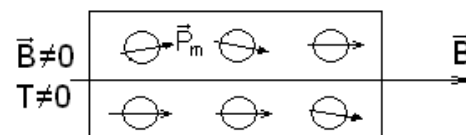
Вещество в магнитном поле

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 \Rightarrow вещество намагничивается.

Магнитные свойства различных веществ гораздо разнообразнее, чем электрические свойства. В то время, как диэлектрическая проницаемость ϵ у всех веществ всегда больше 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 никеля $T_{кр}=630$ К.

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

5. Опыты Фарадея по электромагнитной индукции. Закон Фарадея и правило Ленца.

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

Опыты:

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

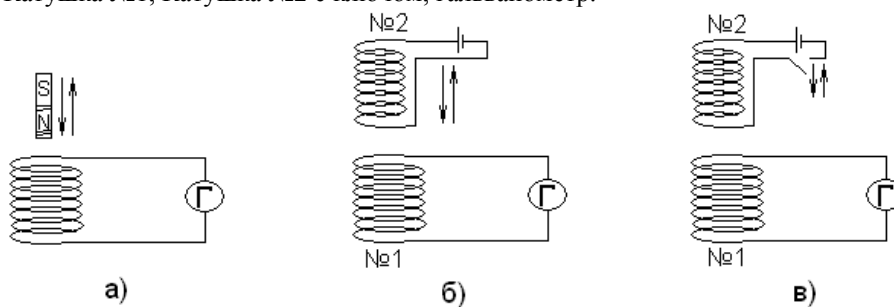


Рис. 42 – Опыты М. Фарадея

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

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

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

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

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

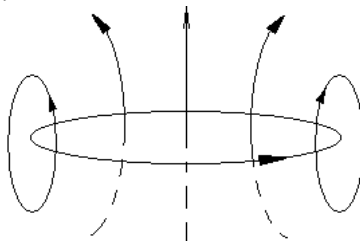


Рис. 43 – Замкнутый проводник в магнитное поле

Выводы:

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).

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

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

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

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

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

Пример:

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

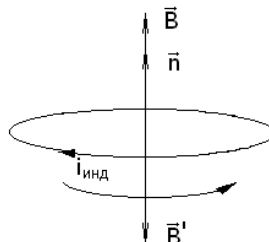


Рис. 44 – Применение правила Ленца

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

6. Самоиндукция и индуктивность контура.

Самоиндукция и взаимная индукция являются частными случаями электромагнитной индукции.

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

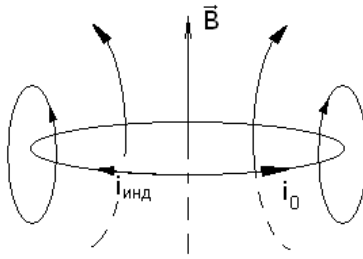


Рис. 45 – Замкнутый контур с переменным током i_0

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

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

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

7. Энергия магнитного поля в катушке. Плотность энергии магнитного поля.

Для того чтобы в неподвижном контуре создать электрический ток, необходимо включить в цепь источник сторонних э. д.с. Если в цепи течет постоянный ток, то энергия, поступающая в цепь из источника сторонних э. д.с., расходуется на выделение джоулевой теплоты и на совершение работы в потребителе энергии. Индукция магнитного поля, как и его энергия, при этом неизменна. Индукция изменяется с изменением силы тока. Следовательно, источник сторонних э. д.с. передает в цепь энергию на создание магнитного поля в процессе увеличения силы тока. Вычислив работу, совершаемую источником сторонних э. д.с. для увеличения силы тока от нуля до конечного значения, получим энергию магнитного поля, которое связано с этим током.

При изменении потока магнитной индукции, охватываемого контуром, в контуре возникает э. д.с. индукции в соответствии с законом (23.1). У изолированного контура поток электромагнитной индукции Φ возникает за счет магнитного поля, создаваемого током в контуре. При увеличении силы тока возрастает поток Φ , охватываемый током, и в контуре по закону Фарадея возникает э. д.с. индукции, которая в данном случае называется э. д.с. самоиндукции. По правилу Ленца, она направлена так, что препятствует увеличению силы тока. Для увеличения силы тока необходимо, чтобы сторонняя э. д.с. источника была направлена противоположно э. д.с. самоиндукции и равна ей. Таким образом, в процессе роста силы тока источник сторонних э. д.с. совершает работу против э. д.с. самоиндукции. За промежуток времени dt по контуру

проходит количество электричества $dQ = Idt$ и, следовательно, против э. д.с. самоиндукции источник сторонних сил в течение dt совершает работу

$$dA = -\mathcal{E}^{\text{самоинд}} Idt = (d\Phi / dt) Idt = Id\Phi, \quad (24.1)$$

Где для $\mathcal{E}^{\text{самоинд}}$ использована формула (23.1). При совершении этой работы происходит превращение энергии источника сторонних э. д.с. в энергию магнитного поля тока в контуре. Поэтому изменение энергии магнитного поля связано с изменением потока соотношением

$$dW_{\text{м}} = Id\Phi \quad (24.2)$$

Индукция магнитного поля тока в соответствии с законом Био-Савара линейно зависит от силы тока. Поэтому при переменной силе тока, протекающего по жесткому неподвижному контуру, картина силовых линий остается прежней, а индукция в каждой точке растет пропорционально силе тока. А это означает, что поток магнитной индукции Φ сквозь фиксированную неподвижную площадь также пропорционален силе тока, и поэтому

$$\Phi = LI \quad (24.3)$$

Где L – постоянный коэффициент пропорциональности, не зависящий от силы тока и индукции магнитного поля. Этот коэффициент называется индуктивностью контура.

Подставляя обе части (24.3) в (24.2), находим

$$dW_{\text{м}} = LI dI = d\left(\frac{1}{2} LI^2\right) \quad (24.4)$$

Интегрируя обе части (24.4) от $I = 0$ до некоторого значения I , получаем формулу

$$W_{\text{м}} = \frac{1}{2} LI^2, \quad (24.5)$$

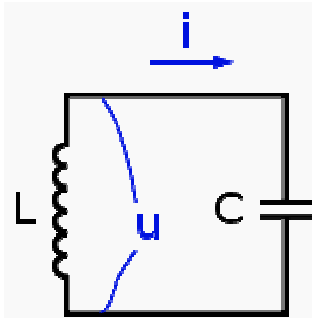
Которая определяет энергию магнитного поля, создаваемого током силы I , текущим по контуру с индуктивностью L .

Это и есть формула, определяющая энергию магнитного поля, созданного током I , текущим по контуру с индуктивностью L .

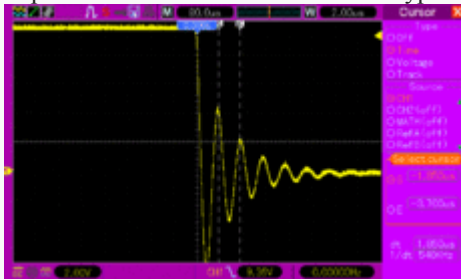
8. Колебательный контур Томсона. Формула Томсона для периода колебаний контура. Электромагнитная волна.

Пусть конденсатор ёмкостью C заряжен до напряжения U_0 . Энергия, запасённая в конденсаторе составляет

$$E_C = \frac{CU_0^2}{2}$$



Параллельный колебательный контур



Осциллограмма LC контура во время замыкания заряженного конденсатора на катушку индуктивности.

C	-	240нФ(заряженный)
L	-	360нГн
$F_0 \approx 542\text{кГц}$		

При соединении конденсатора с катушкой индуктивности, в цепи потечёт ток I , что вызовет в катушке электродвижущую силу (ЭДС)самоиндукции, направленную на уменьшение тока в цепи. Ток, вызванный этой ЭДС (при отсутствии потерь в индуктивности) в начальный момент будет равен току разряда конденсатора, то есть результирующий ток будет равен нулю. Магнитная энергия катушки в этот (начальный) момент равна нулю.

Затем результирующий ток в цепи будет возрастать, а энергия из конденсатора будет переходить в катушку до полного разряда конденсатора. В этот момент электрическая энергия конденсатора $E_C = 0$. Магнитная же энергия, сосредоточенная в катушке, напротив, максимальна и равна

$$E_L = \frac{LI_0^2}{2}, \text{ где } L — \text{индуктивность катушки, } I_0 — \text{максимальное значение тока.}$$

После этого начнётся перезарядка конденсатора, то есть заряд конденсатора напряжением другой полярности. Перезарядка будет проходить до тех пор, пока магнитная энергия катушки не перейдёт в электрическую энергию конденсатора. Конденсатор, в этом случае, снова будет заряжен до напряжения $-U_0$.

В результате в цепи возникают колебания, длительность которых будет обратно пропорциональна потерям энергии в контуре.

В общем, описанные выше процессы в параллельном колебательном контуре называются резонанс токов, что означает, что через индуктивность и ёмкость протекают токи, больше тока проходящего через весь контур, причем эти токи больше в определённое число раз, которое называется добротностью. Эти большие токи не покидают пределов контура, так как они противофазны и сами себя компенсируют. Стоит также заметить, что сопротивление параллельного колебательного контура на резонансной частоте стремится к бесконечности (в отличие от последовательного колебательного контура, сопротивление которого на резонансной частоте стремится к нулю), а это делает его незаменимым фильтром.

Стоит заметить, что помимо простого колебательного контура, есть ещё колебательные контуры первого, второго и третьего рода, что учитывают потери и имеют другие особенности.

9. Законы Максвелла(формулировка) и их опытные обоснования. Перенос энергии волной. Вектор Умова-Пойнтинга.

Электромагнитные волны переносят энергию из одной точки пространства в другую за конечное время из-за конечности скорости распространения электромагнитной волны, равной , как мы убедились выше, скорости света в той среде, где она распространяется.

Энергия W электромагнитной волны внутри некоторого объёма V определяется плотностью энергии w электромагнитного поля волны в соответствии с выражением¹:

$$W = \int w dV$$

Оказывается плотность энергии электромагнитной волны находится в связи с плотностью потока энергии, импульса, связанных с феноменом давления электромагнитных волн.

Рассмотрим определение плотности энергии электромагнитной волны.

Пусть среда, в которой распространяется электромагнитная волна, не является ферромагнетиком или сегнетоэлектриком, неподвижна и не обладает проводимостью ($\sigma = 0$) . В этом случае можно считать равными нулю токи проводимости, поскольку в соответствии с законом Ома эти токи пропорциональны проводимости: $\vec{j} = \sigma \vec{E}$. Вследствие этого нет расхода части энергии электромагнитной волны на увеличение внутренней энергии среды распространения волны из-за выделения Джоулева тепла.

В частном случае однородных сред распространения в соответствии с материальными уравнениями $\vec{D} = \epsilon \epsilon_0 \vec{E}$ и $\vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H}$ объёмная плотность энергии электромагнитной волны может быть рассчитана по формуле²

$$w = \frac{1}{2} \left[\epsilon \epsilon_0 (\vec{E})^2 + \mu \mu_0 (\vec{H})^2 \right]$$

Или в другом виде

$$w = \frac{1}{2} [(\vec{E}, \vec{D}) + (\vec{H}, \vec{B})] \quad (1.23b)$$

Исходя из этих выражений, получим для объёмной плотности энергии плоской гармонической волны:

$$w = w_E + w_H, \quad (1.24a)$$

где: 1) w_E - объёмная плотность энергии электрического поля, равная

$$w_E = \frac{1}{2} \varepsilon \varepsilon_0 (\vec{E}, \vec{E}) = \frac{1}{2} (\vec{E}, \vec{D}) = \frac{1}{2\varepsilon \varepsilon_0} (\vec{D}, \vec{D}) ; \quad (1.24b)$$

2) w_H - объёмная плотность энергии магнитного поля, равная

$$w_H = \frac{1}{2} \mu \mu_0 (\vec{H}, \vec{H}) = \frac{1}{2} (\vec{H}, \vec{B}) = \frac{1}{2\mu \mu_0} (\vec{B}, \vec{B}) \quad (1.24c)$$

Используя соотношения между амплитудами и фазами векторов напряжённости электрического и магнитного полей плоской гармонической электромагнитной волны, получаем, что

$$w_E = w_H \quad (1.25a)$$

В этом случае

$$w = 2w_E = 2w_H = \varepsilon \varepsilon_0 E^2 = \mu \mu_0 H^2 = DB = \mu \varepsilon \mu_0 \varepsilon_0 EH \quad (1.25b)$$

Отсюда следует вывод, что энергия электромагнитной волны делится поровну между её электрической и магнитной составляющими.

Поскольку $v_p = 1/\sqrt{\mu \varepsilon \mu_0 \varepsilon_0}$ скорость распространения электромагнитной волны, из (1.25b) следует, что произведение плотности её энергии на скорость

$$w v_p = EH = S \quad (1.26a)$$

определяет физическую величину, называемую плотностью потока энергии S , переносимой плоской электромагнитной волной.

Действительно, по определению плотности потока энергии S за единицу времени перпендикулярно единичной площадке проходит энергия, сосредоточенная в объёме параллелепипеда с основанием единичной площади и высотой v , равная $v \times w \times 1 \text{ м}^2$ в полном соответствии с (1.26a).

С другой стороны, если известна плотность потока энергии S электромагнитной волны, то из (1.26a) можно найти плотность энергии

$$w = \sqrt{\varepsilon \varepsilon_0 \mu \mu_0} EH = \frac{1}{v_p} EH = \frac{S}{v_p} \quad (1.26b)$$

Плотность потока энергии на самом деле \vec{S} электромагнитной волны, является векторной величиной, величина которой определяется (1.30a), а направление - направлением распространения волны. В этом можно убедиться из следующего более подробного изучения свойств физической величины, представляющей собой плотность потока энергии, и вывода её векторного выражения.

Лекция №10 (2 часа)

Тема: Волновая оптика

1.10.1 Вопросы лекции:

1. Интерференция света и способы ее наблюдения
2. Дифракция света. Дифракционная решетка. Определение длины волны света дифракционной решеткой.
3. Естественный и поляризованный свет. Законы Малюса и Брюстера. Призма Николя и поляроиды. Поляриметры и их применение в ветеринарной лабораторной практике.
4. Спектры и их типы, спектральные закономерности. Спектральный анализ. Поглощение света. Законы Бугера и Бера. Метод колориметрии.

1.10.2 Краткое содержание вопросов

1. Интерференция света и способы ее наблюдения

Интерференцией называется результат наложения двух когерентных волн, в результате которого образуется периодическая картина максимума и минимума интенсивности в виде темных и светлых полос, колец, пятен.

Для того чтобы наблюдалась интерференционная картина, необходимо, чтобы волны испускаемые источником были *когерентными*.

Две волны называются *когерентными*, если в точке наложения разность фаз этих волн остается постоянной.

Впервые идею когерентности реализовал Томас Юнг. В непрозрачной ширме булавкой проделывал два отверстия.

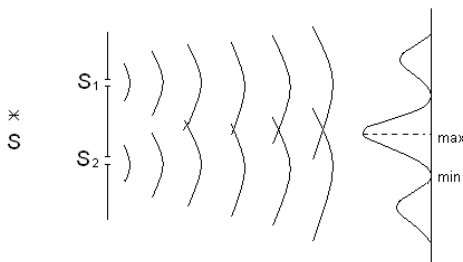


Рис. 54 – Опыт Т. Юнга

Отверстия S_1 и S_2 будут испускать вторичные волны, и они будут когерентны, поскольку образованы от одного и того же *цуга* (цуг – волна, ограниченная в пространстве и во времени). Длина цуга, определяемая интервалом частот, присутствующих в спектре источника света:

$$L = \frac{c}{\Delta\nu} \quad (4.5)$$

От обычных источников света (2 лампочки), интерференционная картина не наблюдается, т.к. источники света не когерентны.

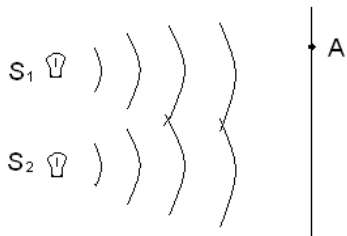


Рис. 55 – Наложение волн от двух лампочек

В точке A интенсивность света от S_1 , $I_1 \sim E^2$, а от S_2 , $I_2 \sim E^2$. Результирующая интенсивность света:

$$I_{\text{рез}} = I_1 + I_2 \quad (4.6)$$

Интерференция отсутствует, поскольку интенсивность всюду одинакова. A должно происходить либо усиление света ($\max I_{\text{рез}} > I_1 + I_2$), либо гашение ($\min I_{\text{рез}} < I_1 + I_2$).

Пусть имеются два когерентных источника света. Выберем некоторую точку на экране. Источники испускают монохроматический свет одной и той же частоты. Результирующая интенсивность в точке А:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Delta \varphi \quad (4.7)$$

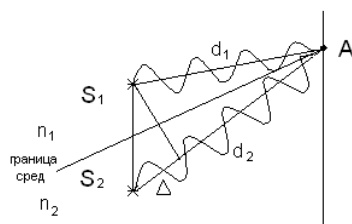


Рис. 56 – Наложение волн от когерентных источников

Узнаем, что же будет с интенсивностью света в точке А. На практике условие max и min интенсивности света выражают через оптическую разность хода:

$$\Delta_{\text{опт}} = n_2 d_2 - n_1 d_1 \quad (4.8)$$

Если в воздухе или вакууме $n_2 = n_1 = 1$, то $\Delta = d_2 - d_1$ – геометрическая разность хода.

Условие максимума интенсивности света:

$$\Delta = n\lambda, \quad (4.9)$$

где $n = 1, 2, 3, \dots$ – целое число.

Если на разности хода укладывается целое число длин волн, то в точке наложения волн будет максимум интенсивности света.

Условие минимума интенсивности света:

$$\Delta = (2n + 1)\lambda/2, \quad (4.10)$$

где $n = 1, 2, 3, \dots$ – целое число.

Если на разности хода укладывается нечетное число длин полуволн, то в точке наложения волн будет минимум интенсивности света.

2. Дифракция света. Дифракционная решетка. Определение длины волны света дифракционной решеткой.

Дифракцией света называется огибание световыми волнами препятствий, встречающихся на их пути. Явление дифракции характерно для волновых процессов. Поэтому, если свет является волновым процессом, то для него должна наблюдаться дифракция, т.е. световая волна, падающая на границу какого-либо непрозрачного тела, должна огибать её.

Попытку объяснить дифракцию в своё время предпринял Х. Гюйгенс на основе своего знаменитого принципа: *Каждая точка, до которой доходит волновое движение, служит центром вторичных сферических волн, огибающая этих волн дает положение фронта в следующий момент времени.*

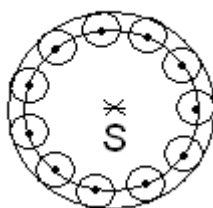
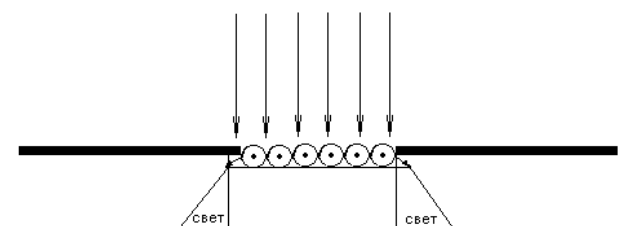


Рис. 58 – Принцип Гюйгенса

Пусть на плоскую преграду с отверстием нормально падает фронт волны (см. рис. 59). По принципу Гюйгенса, каждая точка выделяемого отверстием участка волнового фронта служит центром вторичных волн, которые в однородной и изотропной среде будут сферическими. Построив огибающую вторичных волн, мы убеждаемся в том, что за отверстием волна проникает в область геометрической тени, огибая края преграды.



Френель усовершенствовал принцип Гюйгенса, добавив к нему утверждение о *когерентности* вторичных волн. Они действительно когерентны, поскольку зарождаются на волновой поверхности, имеют одинаковые начальные фазы, разность которых от времени зависеть не будет.

Совокупность большого числа узких параллельных щелей, расположенных близко друг от друга, называется *дифракционной решеткой*, а расстояние между соседними щелями – периодом решетки d .

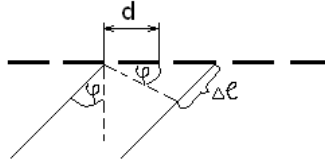


Рис. 60 – Дифракционная решетка

Дифракционная решетка изготавливается путем нанесения тонких штрихов (царапин) на поверхности стеклянной пластинки (прозрачная решетка) или зеркала (отражательная решетка).

Дифракционная решетка работает, как спектральный прибор, заменяя призму, но отличается равной растянутостью линий спектра. Поэтому посредством дифракционной решетки проводятся очень точные измерения длины волны света.

Рассмотрим ход лучей в дифракционной решетке (см. рис. 60). Разность хода лучей:

$$\Delta l = d \sin \varphi \quad (4.12)$$

Если разность хода Δl равна целому числу волн, т.е. при условии:

$$d \sin \varphi = n \lambda \quad (4.13)$$

В результате на экране получим максимум интенсивности света. При разности хода Δl равному нечетному числу полуволн, т.е. при условии:

$$d \sin \varphi = (2n + 1) \lambda / 2 \quad (4.14)$$

В итоге на экране получится минимум интенсивности света.

Согласно формуле (4.13), местоположение каждого максимума зависит от длины волны света. Чем больше длина волны света, тем больше $\sin \varphi$, т.е. тем под большим углом дифракции φ получится максимум для этой волны. Таким образом, при использовании белого света, каждый максимум (кроме центрального) приобретет радужную окраску, т.е. происходит разложение белого света в спектр (фиолетовый ближе к центральному максимуму, поскольку длина волны короче красного).

3. Естественный и поляризованный свет. Законы Малюса и Брюстера. Призма Николя и поляроиды. Поляриметры и их применение в ветеринарной лабораторной практике.

Естественный и поляризованный свет. Поляризация света – физическая характеристика оптического измерения, описывающая поперечную анизотропию световых волн, т.е. неэквивалентность различных направлений в плоскости, перпендикулярной световому лучу. Свет – суммарное электромагнитное излучение множества атомов, если из множества выбрать одну, то её можно представить в виде двух взаимно перпендикулярных векторов \vec{E} и \vec{H} . Электромагнитная волна – волна поперечная. Все законы изменения аналогичны законам изменения \vec{E} , поэтому, для простоты рассуждений, будем говорить лишь о \vec{E} . Т.к. источниками света являются атомы, а их количество в источнике N , то пространственную ориентацию для произвольно выбранного момента расположение векторов источника можно дать в виде \vec{E} . Все направления равновероятны (ориентации различны) – естественный свет. Если под действием внешних влияний на свет (или особенностей источника), появляется преимущественное направление колебаний \vec{E} , то свет – частично поляризован. Если колебания происходят только в одном определённом направлении – полностью поляризованный свет. Плоскость колебаний называется плоскостью колебаний. Плоскость колебаний называется плоскостью поляризации. Примеры: Естественный свет – дневной. Частично поляризованный свет – искусственные источники света: а) электрическая лампочка – поляризация до 15 – 20%; б) ртутная лампа – поляризация до 5 – 8%; Для характеристики поляризации вводят коэффициент – степень поляризации P или ρ ,
$$\rho = \frac{J_{\min}}{J_{\max}} \quad (1)$$
 где J_{\min} и J_{\max} – max и min интенсивности света, соответствующие двум взаимно перпендикулярным компонентам вектора \vec{E} . Из уравнения (1) следует: а) для естественного света: $J_{\min} = J_{\max}$ ($J_1 = J_2$) и $P = 0$; б) для полностью поляризованного света: $J_{\min} = 0$ ($J_2 = 0$) и $P = 1$; в) для частично поляризованного света: $0 < P < 1$. II. Методы и виды поляризации. А. Поляризация света при отражении и преломлении. Отражённые и преломленные лучи всегда частично поляризованы. Степень поляризации зависит от: а) угла падения лучей; б) коэффициента преломления отражающей среды. Брюстер установил закон полной поляризации. Закон Брюстера. Полная поляризация лучей происходит при условии, если тангенс угла падения i равен показателю преломления отражающей среды n . $i = i_B$ – угол Брюстера, или угол полной поляризации. Легко показать, что i_1 и i_2 взаимно перпендикулярны. Если взять несколько границ раздела, то можно получить, что и луч 2 будет полностью поляризованным (оптическая стопа). Закон неприменим к металлам. Б. Двойное лучепреломление. Получать поляризованный свет можно

различными путями. Для этих целей используются некоторые естественные кристаллы, которые обладают свойством анизотропии, т.е. различными оптическими свойствами по различным направлениям (кварц, исландский шпат CaCO_3): а) колебания по различным направлениям различны; б) преломление на границе раздела двух сред для различных векторов также различно, т.е. вектора E_x и E_y фактически имеют различный показатель преломления n . Это всё приводит к тому, что световой луч раздваивается. Раздвоение естественного луча на два луча, поляризованных в различных плоскостях, называется двойным лучепреломлением. В кристалле имеется направление, распространяясь параллельно которому, луч света не разбивается на два луча. Это направление называется оптической осью кристалла. Кристаллы, имеющие одну ось, называются одноосными, две – двуосными. В одноосном кристалле: плоскость, проходящая через направление луча и направление оптической оси, называется главным сечением. В двуосном кристалле: плоскость, проходящая через обе оптические оси, называется главным сечением кристалла. Оптическая ось не представляет какой-то строго фиксированной линии в кристалле, а является лишь направлением, вдоль которого кристалл обладает особыми свойствами, поэтому любая линия, параллельная этому направлению, представляет собой оптическую ось (в одноосном кристалле бесконечное множество главных сечений). Рассмотрим случай падения лучей в одноосном кристалле. При любой ориентации падающего луча относительно направления оптической оси расположение его компонент следующее: а) компонента – вектор напряжённости электрического поля, по определению, везде направлен перпендикулярно направлению оптической оси и лежит в плоскости главного сечения, т.е. имеет одну и ту же ориентацию, независимо от угла падения, а следовательно, скорость распространения и показатель преломления не зависят от угла падения; б) компонента (компонента необыкновенного луча) везде лежит в плоскости главного сечения, а следовательно, должна зависеть от угла падения луча, поэтому и скорость распространения и n зависят от угла падения. Вывод: Электрические колебания в обыкновенной волне совершаются перпендикулярно плоскости главного сечения, а электрические колебания в необыкновенной волне совершаются в плоскости главного сечения. Явления двойного лучепреломления используют для получения поляризованного света. Для этих целей используют призмы. Одна из наиболее известных поляризационных призм – призма Николя (николь), изобретена в 1828 году английским физиком У. Николем. Изготавливается из исландского шпата (CaCO_3). Призма состоит из двух трехгранных призм, склеенных слоем канадского бальзама, показатель преломления которого обеспечивает полное внутреннее отражение для обыкновенного луча, т.е. призма Николя – однолучевая призма. Необходимо отметить, что интенсивность естественного луча J_0 при двойном лучепреломлении равна сумме интенсивностей обыкновенного и необыкновенного лучей: $J_0 = J_{об} + J_{е}$ или (2)

4. Спектры и их типы, спектральные закономерности. Спектральный анализ. Поглощение света. Законы Бугера и Бера. Метод колориметрии.

Спектральный анализ — совокупность методов качественного и количественного определения состава объекта, основанная на изучении спектров взаимодействия материи с излучением, включая спектры электромагнитного излучения, акустических волн, распределения по массам и энергиям элементарных частиц и др.

В зависимости от целей анализа и типов спектров выделяют несколько методов спектрального анализа. *Атомный и молекулярный* спектральные анализы позволяют определять элементарный и молекулярный состав вещества, соответственно. В эмиссионном и абсорбционном методах состав определяется по спектрам испускания и поглощения.

Масс-спектрометрический анализ осуществляется по спектрам масс атомарных или молекулярных ионов и позволяет определять изотопный состав объекта

Атомы каждого химического элемента имеют строго определённые резонансные частоты, в результате чего именно на этих частотах они излучают или поглощают свет. Это приводит к тому, что в спектроскопе на спектрах видны линии (тёмные или светлые) в определённых местах, характерных для каждого вещества. Интенсивность линий зависит от количества вещества и его состояния. В количественном спектральном анализе определяют содержание исследуемого вещества по относительной или абсолютной интенсивностям линий или полос в спектрах.

Оптический спектральный анализ характеризуется относительной простотой выполнения, отсутствием сложной подготовки проб к анализу, незначительным количеством вещества (10—30 мг), необходимого для анализа на большое число элементов.

Атомарные спектры (поглощения или испускания) получают переводением вещества в парообразное состояние путём нагревания пробы до 1000—10000 °С. В качестве источников возбуждения атомов при эмиссионном анализе токопроводящих материалов применяют искру, дугу переменного тока; при этом пробу помещают в кратер одного из угольных электродов. Для анализа растворов широко используют пламя или плазму различных газов.

Лекция №11 (2 часа)

Тема: Тепловое излучение. Квантовый механизм излучения света. Строение атома. Физика атомного ядра

1.11.1 Вопросы лекции:

1. Абсолютно черное тело. Законы Кирхгофа, Стефана-Больцмана и Вина Тепловое излучение тела животных.
2. Формула Планка. Фотоэффект. Квантовый механизм поглощения света. Фотоны.
3. Корпускулярно-волновой дуализм света. Биофизика зрительного восприятия.
4. Планетарная модель атома. Теория Бора. Объяснение спектральных закономерностей.
5. Волновые свойства электрона. Формула де Бройля. Дифракция электронов.
6. Состав и характеристики атомного ядра. Нуклоны. Энергия связи нуклонов в ядре.
7. Явление радиоактивности. Закон радиоактивного распада. Альфа, бета и гамма-излучения. Их свойства. Биологическое действие ионизирующих излучений.
8. Биологическое действие ионизирующих излучений.

1.11.2 Краткое содержание вопросов

1. Абсолютно черное тело. Законы Кирхгофа, Стефана-Больцмана и Вина Тепловое излучение тела животных.

Излучение электромагнитных волн может осуществляться за счет различных видов энергии. Самым распространенным является тепловое излучение.

Тепловое излучение – это излучение электромагнитных волн за счет внутренней энергии тела.

Тепловое излучение обусловлено тепловым движением молекул и поэтому имеет место при любой температуре тела. Тепловое излучение имеет непрерывный спектр. Это означает, что нагретое тело испускает некоторое количество энергии излучения в любом диапазоне частот или длин волн.

Тепловое излучение может быть равновесным. Если несколько нагретых излучающих тел окружить идеально отражающей, непроницаемой для излучения оболочкой, то по истечении некоторого промежутка времени в системе "излучающие тела + излучение в полости" установится термодинамическое равновесие. Это означает, что температуры всех тел станут равными, а распределение энергии между телами и излучением не будет изменяться со временем. Такое равновесное состояние системы устойчиво, т. е. после всякого его нарушения состояние равновесия вновь восстанавливается. Термодинамическое равновесие установится и в полости, стенки которой выполнены из любого реального материала и имеют одинаковую температуру.

Способность теплового излучения находиться в равновесии с излучающим телом отличает тепловое излучение от других видов излучения тел. Поэтому такое излучение будем называть равновесным.

Характеристики теплового излучения.

1. Спектральная плотность энергетической светимости.

Спектральная плотность энергетической светимости – мощность излучения с единицы площади поверхности тела в интервале частот единичной ширины. Опыт показывает, что для каждого тела является определенной функцией частоты, вид которой изменяется при изменении температуры тела T :

$$r(\nu, T)$$

2. Интегральная энергетическая светимость.

Интегральная энергетическая светимость – мощность излучения с единицы площади поверхности тела во всем диапазоне частот: $R(T)$.

$R(T)$ показывает, сколько всего энергии излучается с единицы площади в виде э/м волн.

Зная спектральную плотность энергетической светимости, можно вычислить интегральную энергетическую светимость (ее называют просто энергетической светимостью тела), просуммировав по всем частотам:

$$R(T) = \int_0^{\infty} r(\nu, T) d\nu$$

3. Спектральная поглощательная способность.

Пусть на элементарную площадку поверхности тела падает поток излучения энергии $d\Phi_\nu$, приходящийся на интервал частот $d\nu$. Часть этого потока $d\Phi'_\nu$ будет поглощена телом. Безразмерная величина

$$A(\nu, T) = \frac{d\Phi'_\nu}{d\Phi_\nu}$$

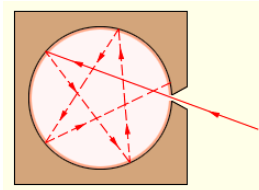
называется спектральной поглощательной способностью тела.

По определению поглощательная способность тела не может быть больше единицы: $A(\nu, T) \leq 1$

Абсолютно черное тело.

Тело, способное поглощать полностью при любой температуре все падающее на него излучение любой частоты, называется *абсолютно черным телом*. Следовательно, спектральная поглощательная способность абсолютно черного тела для всех частот и температур тождественно равна единице $A(\nu, T) \equiv 1$.

Абсолютно черных тел (АЧТ) в природе не существует. И все же реализовать модель АЧТ возможно. Для этого используют полость с небольшим отверстием. При этом полость может иметь практически любую форму и быть изготовленной из любого непрозрачного материала. Излучение, проникнув через отверстие, попадает на стенки полости, частично поглощаясь ими. При малых размерах отверстия луч должен претерпеть множество отражений, прежде чем он сможет выйти из отверстия. При многократных отражениях на стенках полости излучение, попавшее в полость, практически полностью поглотится. Малое отверстие полости будет вести себя как АЧТ. Отметим, что если стенки полости поддерживать при некоторой температуре T , то отверстие будет излучать, и это излучение с большой степенью точности можно считать излучением абсолютно черного тела, имеющего температуру T .



Закон Кирхгофа.

Между испускательными и поглощательными свойствами любого тела должна существовать связь. Ведь равновесие в системе может установиться только в том случае, если каждое тело будет излучать в единицу времени столько же энергии, сколько оно поглощает. Это означает, что тела, интенсивнее поглощающие излучение какой-либо частоты, будут это излучение интенсивнее и испускать.

Закон Кирхгофа: отношение спектральной плотности энергетической светимости к спектральной поглощательной способности не зависит от природы тела и является для всех тел универсальной функцией частоты волны и температуры:

$$\frac{r(\nu, T)}{A(\nu, T)} = r_0(\nu, T)$$

$r_0(\nu, T)$ - универсальная функция Кирхгофа.

Для абсолютно черного тела $A(\nu, T) \equiv 1$, поэтому из закона Кирхгофа вытекает, что $r(\nu, T)$ для черного тела равна $r_0(\nu, T)$. Таким образом, универсальная функция Кирхгофа $r_0(\nu, T)$ есть не что иное, как спектральная плотность энергетической светимости абсолютно черного тела. Поэтому важно знать характер излучения АЧТ.

Излучение абсолютно черного тела имеет универсальный характер в теории теплового излучения. Реальное тело излучает при любой температуре всегда меньше энергии, чем абсолютно черное тело. Зная спектральную плотность энергетическую светимость абсолютно черного тела (универсальную функцию Кирхгофа) и поглощательную способность реального тела, из закона Кирхгофа можно определить энергию, излучаемую этим телом в любом диапазоне частот или длин волн.

Закон Стефана-Больцмана.

Экспериментальные (Й. Стефан, 1879) и теоретические (Л. Больцман, 1884) исследования позволили доказать важный закон теплового излучения абсолютно черного тела.

Этот закон утверждает, что интегральная энергетическая светимость абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры:

$$R(T) = \sigma T^4$$

Где константа $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2\text{К}^4$ – постоянная Стефана-Больцмана.

Закон Вина.

В 1893 г. немецкий физик В. Вин сформулировал закон теплового излучения, согласно которому длина волны λ_m , на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела, обратно пропорциональна его абсолютной температуре:

$$\lambda_m = \frac{b}{T}$$

Где константа $b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м*К}$ – постоянная Вина. Закон Вина еще называют законом смещения Вина, потому что он показывает смещение положения максимума функции $r(\nu, T)$ по мере возрастания температуры в область коротких длин волн.

Квантовая теория излучения.

Впервые строгую попытку теоретического вывода зависимости $r(\nu, T)$ осуществили Д. Рэлей (1900) и Д.

Джинс (1905). Была получена формула: $r(\nu, T) = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT$ (*), которую называют формулой Релея-

Джинса. Она дает достаточно хорошее согласие с экспериментом при малых частотах ν . Однако при больших частотах ν спектральная плотность энергетической светимости значительно превосходит наблюдаемую. Кроме того, интегрируя (*) по всем частотам, мы получаем бесконечные значения для

интегральной энергетической светимости абсолютно черного тела:

$$R(T) = \int_0^{\infty} \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT d\nu = \frac{2\pi}{c^2} kT \int_0^{\infty} \nu^2 d\nu = \infty.$$

Таким образом, из классической теории теплового излучения следует вывод о том, что при конечных значениях энергии излучения равновесие между веществом и излучением невозможно. Но он противоречит опыту.

Этот противоречивый результат, содержащийся в формуле Рэлея — Джинса, вывод которой с точки зрения классической теории не вызывал сомнений, П. Эренфест назвал "ультрафиолетовой катастрофой".

"Ультрафиолетовая катастрофа" показала, что классическая физика содержит ряд принципиальных внутренних противоречий, которые проявились в теории теплового излучения и разрешить которые можно только с помощью принципиально новых физических идей.

Такая физическая идея была сформулирована в 1900 г. М. Планком в виде *гипотезы о квантах*. Согласно этой гипотезе, излучение испускается веществом не непрерывно, а конечными порциями энергии, которые Планк назвал квантами. Энергия кванта зависит от частоты излучения и определяется по формуле

$$E = h\nu$$

Здесь $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ — новая фундаментальная физическая константа, которую называют *постоянной Планка*.

Полученная Планком формула

$$r(\nu, T) = \frac{2\pi h \nu^2}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

блестяще согласуется с экспериментальными данными по распределению энергии в спектрах излучения черного тела во всем интервале частот и температур. Теоретический вывод этой формулы М. Планк изложил 14 декабря 1900 г. на заседании Немецкого физического общества. Этот день стал датой рождения квантовой физики.

2. Формула Планка. Фотоэффект. Квантовый механизм поглощения света. Фотон.

Фотоэффект — это испускание электронов из вещества под действием падающего на него излучения.

Детальное экспериментальное исследование закономерностей фотоэффекта для металлов было выполнено в 1888 г. А.Г. Столетовым.

Экспериментально были установлены следующие основные *законы фотоэффекта*:

1. При фиксированной частоте падающего света число фотоэлектронов, вырываемых из катода в единицу времени, пропорционально интенсивности света.
2. Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно возрастает с увеличением частоты и не зависит от интенсивности падающего света.
3. Для каждого вещества существует «красная граница» фотоэффекта, т. е. минимальная частота ν_0 света, при которой свет любой интенсивности фотоэффекта не вызывает.

Качественное объяснение фотоэффекта с волновой точки зрения на первый взгляд не должно было бы представлять трудностей. Действительно, под действием поля световой волны в металле возникают вынужденные колебания электронов, амплитуда которых (например, при резонансе) может быть достаточной для того, чтобы электроны покинули металл; тогда и наблюдается фотоэффект. Кинетическая энергия, с которой электрон вырывается из металла, должна была бы зависеть от интенсивности падающего света, так как с увеличением последней электрону передавалась бы большая энергия. Однако этот вывод противоречит II закону фото-

фотоэффекта. Так как, по волновой теории, энергия, передаваемая электронам, пропорциональна интенсивности света, то свет любой частоты, но достаточно большой интенсивности должен был бы вырывать электроны из металла; иными словами, «красной границы» фотоэффекта не должно быть, что противоречит III закону фотоэффекта. Кроме того, волновая теория не смогла объяснить безынерционность фотоэффекта, установленную опытами. Таким образом, фотоэффект необъясним с точки зрения волновой теории света.

Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта. Фотон.

А. Эйнштейн в 1905 г. показал, что явление фотоэффекта и его закономерности могут быть объяснены на основе предложенной им квантовой теории фотоэффекта. Согласно Эйнштейну, свет частотой ν не только испускается, как это предполагал Планк, но и распространяется в пространстве и поглощается веществом отдельными порциями (квантами), энергия которых $E = h\nu$. Таким образом, распространение света нужно рассматривать не как непрерывный волновой процесс, а как поток локализованных в пространстве дискретных световых квантов, движущихся со скоростью распространения света в вакууме. Эти кванты электромагнитного излучения получили название *фотонов*.

Каждый квант поглощается только одним электроном. Поэтому число вырванных фотоэлектронов должно быть пропорционально интенсивности света (I закон фотоэффекта). Безынерционность фотоэффекта объясняется тем, что передача энергии при столкновении фотона с электроном происходит почти мгновенно.

Энергия падающего фотона расходуется на совершение электроном работы выхода A из металла и на сообщение вылетевшему фотоэлектрону кинетической энергии $\frac{mv^2}{2}$. По закону сохранения энергии:

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2} \text{ уравнение Эйнштейна для фотоэффекта.}$$

С помощью уравнения Эйнштейна можно объяснить все закономерности фотоэффекта.

Масса и импульс фотона.

Согласно гипотезе световых квантов Эйнштейна, свет испускается, поглощается и распространяется дискретными порциями (квантами), названными фотонами. Энергия фотона $E = h\nu$.

Свойства фотона могут быть описаны только с использованием основных соотношений специальной теории относительности. В частности, из этой теории следует, что фотон является уникальной элементарной частицей, имеющей нулевую массу покоя. Это означает, что фотон всегда движется со скоростью света и не может находиться в состоянии покоя. Если при неупругом столкновении с другой элементарной частицей фотон "останавливается", то он исчезает, передавая всю свою энергию этой частице.

Определим массу фотона из взаимосвязи энергии и массы (см. лек СТО):

$$m = \frac{h\nu}{c^2} \text{ масса фотона.}$$

Движущийся со скоростью c фотон обладает импульсом, величина которого связана с его энергией релятивистским соотношением $p = \frac{E}{c}$. Отсюда следует, что

$$p = \frac{h\nu}{c} \text{ импульс фотона.}$$

Если фотоны обладают импульсом, то свет, падающий на тело, должен оказывать на него давление. Так с квантовой точки зрения объясняется давление света.

Эффект Комптона.

Наиболее полно корпускулярные свойства излучения проявляются в эффекте Комптона.

В 1923 г. А. Комптон, изучая рассеяние рентгеновского излучения на парафине, обнаружил, что длина волны рассеянного излучения λ больше, чем длина волны падающего излучения λ_0 .

Такой эффект увеличения длины волны рентгеновского излучения вследствие рассеяния его веществом получил название *эффекта Комптона*.

Опыты показали, что разность $\lambda - \lambda_0$ не зависит от длины волны падающего излучения и природы рассеивающего вещества, а определяется только величиной угла рассеяния θ :

$$\lambda - \lambda_0 = 2\Lambda \sin^2 \frac{\theta}{2} \quad (1)$$

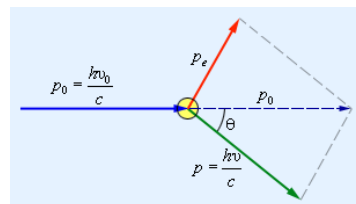
где $\Lambda = 2,43$ пм – так называемая комптоновская длина волны, не зависящая от свойств рассеивающего вещества.

Увеличение длины волны излучения при его рассеянии необъяснимо с точки зрения волновой теории электромагнитного излучения.

Все особенности эффекта Комптона можно объяснить на основе квантовых представлений о природе излучения. Если принять, что излучение представляет собой поток фотонов, то эффект Комптона есть результат упругого столкновения рентгеновских фотонов со свободными электронами вещества. У легких атомов рассеивающих веществ электроны слабо связаны с ядрами атомов, поэтому их можно считать свободными. В процессе столкновения фотон передает электрону часть своей энергии и импульса в соответствии с законами сохранения.

Из соотношений, выражающих законы сохранения энергии и импульса, после преобразований можно получить:

$$\lambda - \lambda_0 = 2 \frac{h}{m_e c} \sin^2 \frac{\theta}{2} \quad (2)$$



Это выражение есть не что иное, как полученная экспериментально Комптоном формула (1). Подстановка в нее значений h , m_e (масса электрона), c дает комptonовскую длину волны электрона $\Lambda = 2,43$ пм. Сравнение (1) с (2) показывает прекрасное совпадение выводов квантовой теории излучения и эксперимента.

3. Корпускулярно-волновой дуализм света. Биофизика зрительного восприятия.

Рассмотренные явления – тепловое излучение тела, фотоэффект, эффект Комптона – свидетельствуют о квантовых (корпускулярных) свойствах света, т.е. свет представляет собой поток световых частиц – фотонов. С другой стороны, такие явления, как интерференция, дифракция и поляризация света, свидетельствуют о волновой природе света. Таким образом, электромагнитное излучение проявляет, казалось бы, взаимоисключающие свойства – свойства волны (непрерывность) и свойства частиц (дискретность).

Ранее были получены соотношения, связывающие корпускулярные свойства электромагнитного излучения (энергия и импульс фотона) с волновыми свойствами (частота и длина волны)

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}, \quad p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}.$$

Свет, обладая одновременно корпускулярными и волновыми свойствами, обнаруживает определенные закономерности в их проявлении. Так, волновые свойства света проявляются в процессах, связанных с его распространением: интерференции, дифракции, поляризации, а корпускулярные – в процессах взаимодействия света с веществом. Чем больше длина волны, тем меньше энергия и импульс фотона и в меньшей степени проявляются квантовые свойства света (с этим связано, например, существование красной границы фотоэффекта). Наоборот, чем меньше длина волны, тем больше энергия и импульс фотона и в меньшей степени проявляются волновые свойства света (например, дифракция рентгеновского излучения обнаружена лишь при использовании в качестве дифракционной решетки кристаллов).

Итак, в результате углубления представлений о природе света выяснилось, что свет обладает двойственной природой, получившей название корпускулярно-волнового дуализма света.

4. Планетарная модель атома. Теория Бора. Объяснение спектральных закономерностей.

Подозрение о том, что все тела состоят из атомов возникло ещё 2000 лет назад в Греции (от греч. атомос – неделимый).

В начале XIX в. стало ясно, что без атомных представлений вещества не обойтись. Как устроен атом? На тот момент не было экспериментальных данных. С открытием рентгеновских лучей, катодных лучей (пучок электронов), исследовали влияние электрических и магнитных полей на оптические явления. Когда были открыты закономерности в оптических спектрах, возникла необходимость рассуждать на тему, как устроен атом. К началу XX в. было с полной достоверностью установлено:

1. Атом в целом электронейтрален;
2. В состав атома входят отрицательно заряженные электроны.

В 1904 г. Д. Томсон высказал гипотезу о том, как устроен атом. Открыв в 1897 году электрон, Томсон предположил, что «корпускулы» (так Томсон называл электроны, хотя ещё в 1894 году Дж. Дж. Стоуни предложил называть «атомы электричества» электронами) являются составными частями атома и решил создать модель атома, отражающую это предположение. С точки зрения Томсона:

...атомы элементов состоят из нескольких отрицательно заряженных корпускул, заключённых в сферу, имеющую однородно распределённый положительный электрический заряд...

Атом по Томсону состоит из электронов, помещённых в положительно заряженный «суп», компенсирующий отрицательные заряды электронов, подобно отрицательно заряженным «изюминкам» в положительно заряженном «пудинге». Электроны, как предполагалось, были распределены по всему атому.

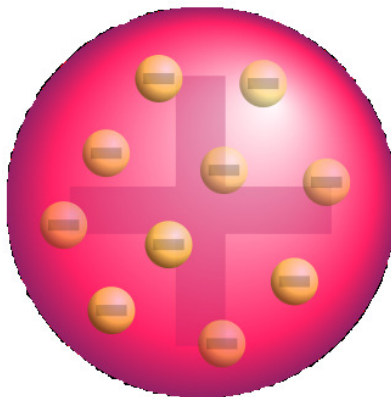


Рис. 90 – «Пудинговая модель атома» по Томсону

Испускание света атомом Томсон объяснял колебаниями электронов. Однако модель атома, предложенная Томсоном, оказалась недостоверной, поскольку такой атом должен давать *сплошной* спектр. Как показывала практика, атом дает *линейчатый* спектр.

Важный вклад в создание теории строения атома внёс английский физик Эрнест Резерфорд (1871 – 1937), который проводил опыты по изучению прохождения *альфа-частиц* через тонкие металлические пластины золота и платины. Таким образом, предлагалось изучить рассеяние (изменение направления движения) альфа-частиц в веществе.

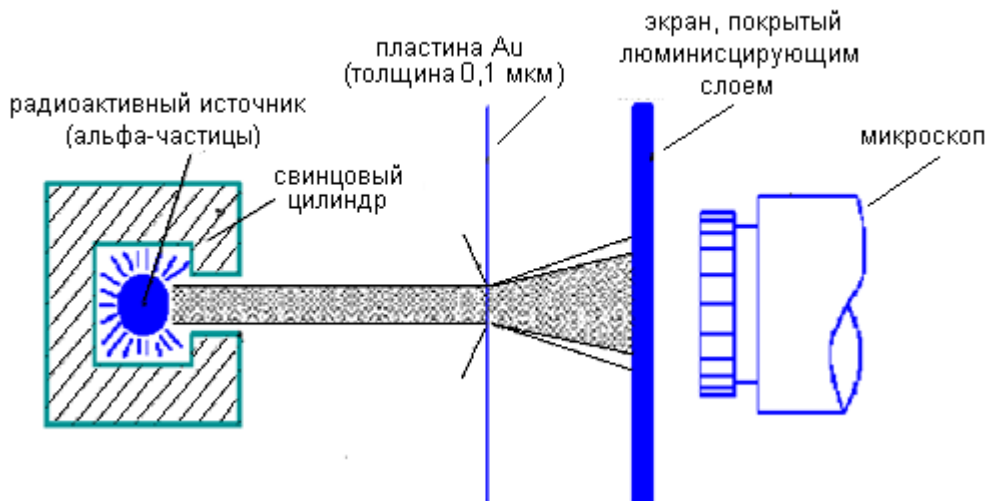


Рис. 91 – Опыт Резерфорда

В результате проведенных экспериментов, Резерфорд выяснил:

1. Большинство частиц проходит не рассеиваясь. Получил расстояние сближения $r \approx 10^{-15}$ м, а размер атома $d = 10^{-10}$ м, т.е. в 100000 раз $r < d_a$;

2. Редчайшие случаи отклонения частиц в обратную сторону.

Всё говорит о том, что положительный заряд атома и большая часть массы атома сосредоточена в очень малом объеме по сравнению с самим размером атома. Получается, что атом «рыхлый, пустой».

Эрнестом Резерфордом в результате эксперимента с рассеиванием альфа-частиц была предложена модель строения атома – *планетарная модель атома*. По этой модели атом состоит из небольшого положительно заряженного ядра, в котором сосредоточена почти вся масса атома, вокруг которого движутся электроны, – подобно тому, как планеты движутся вокруг Солнца.

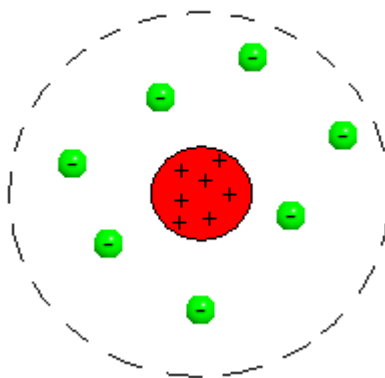


Рис. 92 – Планетарная модель Резерфорда

Недостатком планетарной модели была её *несовместимость* с законами классической физики. Если электроны движутся вокруг ядра как планеты вокруг Солнца, то их движение ускоренное, и, следовательно, по законам классической электродинамики они должны были бы излучать электромагнитные волны, терять энергию и падать на ядро. Следующим шагом в развитии планетарной модели стала *модель Бора*, постулирующая другие, отличные от классических, законы движения электронов. Полностью противоречия электродинамики смогла решить квантовая механика.

5. Волновые свойства электрона. Формула де Бройля. Дифракция электронов.

Волны де Бройля – название некоторого волнового процесса, описывающего состояние микрочастиц. Это понятие было введено в 1923 г. французским физиком Луи де Бройлем. Дальнейшее уточнение этой

концепции придало волнам де Бройля смысл волновой функции и сделало эту концепцию основой современной квантовой механики.

К тому времени в физике уже сложилась необычная, но подтвержденная опытом ситуация: в одних явлениях (интерференция, дифракция) свет ведет себя как *волны*. Другие явления (фотоэффект, тормозное рентгеновское излучение, эффект Комптона) с неменьшей убедительностью показывают, что он ведет себя как *частицы*. Де Бройль поставил вопрос, не распространяется ли такой *корпускулярно-волновой дуализм* и на обычные частицы? Он предположил, что движение каждой частицы обладает волновыми свойствами. Причем длина волны свободной частицы равна

$$\lambda_{\text{Бр}} = \frac{h}{p}, \quad (1)$$

где h – постоянная Планка, p – импульс частицы.

Переход от волн де Бройля к последовательным представлениям квантовой механики состоит в том, что рассматривается не только свободное движение частицы, но и более общий случай движения во внешних полях. При этом для описания движения используется комплексная волновая функция $\Psi(r, t)$.

Представление о волнах де Бройля, в частности, поясняет отбор допустимых орбит (стационарных состояний) в атоме водорода Бора, исходя из требования, чтобы для устойчивого движения на орбите укладывалось целое число длин волн. В этом случае волна при обходе ядра будет каждый раз возвращаться в исходную точку с той же амплитудой и фазой, что как раз и соответствует стационарной орбите.

Аналогично дискретный набор состояний частицы в потенциальной яме определяется теми состояниями, для которых на ширине ямы укладывается целое число длин полуволен де Бройля.

Открытие дифракции электронов подтвердило гипотезу де Бройля. Однако физический смысл волновой функции был выяснен после работ В. Гейзенберга, Э. Шредингера, Н. Бора, М. Борна.

Дифракция электронов на кристалле

Дифракция электронов при отражении от кристаллов была фактически обнаружена, но не понята еще до появления гипотезы де Бройля. Произведя опыты по рассеянию электронов тонкими металлическими фольгами в 1921-1923 годах, Дэвиссон и Кэнсман наблюдали выраженную зависимость интенсивности рассеянного пучка от угла рассеяния. При этом положение и величина получающихся максимумов на кривой рассеяния существенно зависела от скорости электронов.

Происхождение максимумов и минимумов на кривых рассеяния оставалось непонятным, пока их не истолковали как результат интерференционного отражения волн де Бройля от соответствующих атомных плоскостей. Это было подтверждено в 1927 г. целенаправленными опытами Дэвиссона и Джермера, в которых гипотеза де Бройля была подвержена количественной проверке. В этих опытах использовался метод Брэгга, хорошо известный в теории дифракции рентгеновских лучей.

Рассмотрим плоскую волну, падающую на фрагмент кристалла под углом скольжения φ , как это показано на Рис.1а. Взаимодействие рентгеновских лучей с атомами кристалла приводит к появлению волн, распространяющихся в различных направлениях, в том числе направлении зеркального отражения от атомных плоскостей кристалла, показанных на Рис.1 пунктиром. Вычислим разность хода двух волн, зеркально отразившихся от соседних атомных плоскостей. На рисунке 1б видно, что она равна

$$\Delta = |AB| + |BD| = 2|BC| \sin \varphi = 2d \sin \varphi$$

где d – межплоскостное расстояние. Если эта разность кратна целому числу длин волн, то эти волны усиливают друг друга, в результате чего и возникает отраженная волна. Это требование называется *условием Брэгга-Вульфа*:

$$2d \sin \varphi = m\lambda, \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (2)$$

Необходимым условием такой трактовки отражения является малость длины волны:

$$\left(\frac{m\lambda}{2d}\right) < 1 \quad (3)$$

Такое условие для волн де Бройля выполняется при ускоряющем напряжении в сотни и тысячи вольт. Поэтому, даже не зная детально самого механизма отражения волн де Бройля, можно ожидать, что оно также носит интерференционный характер. По этой причине условие (2) может выполняться и для волн де Бройля.

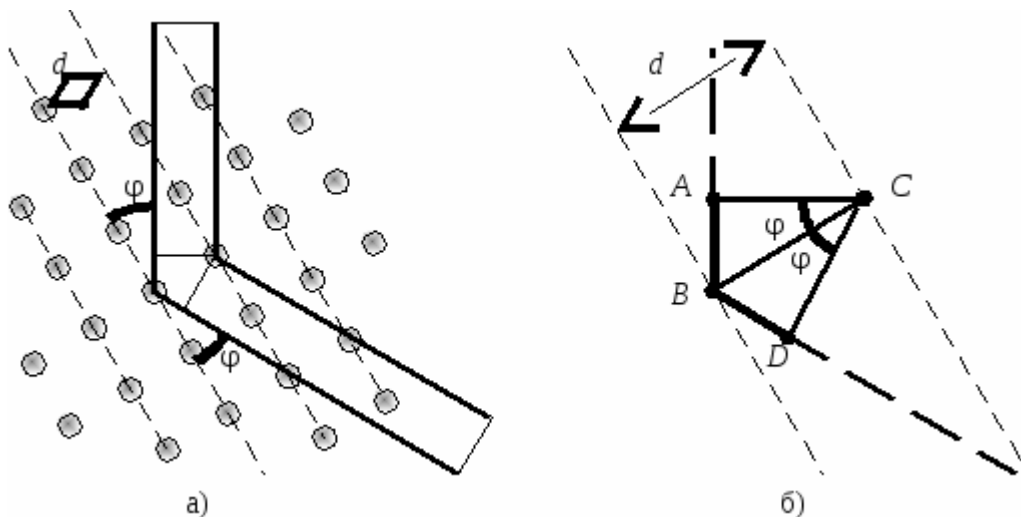


Рис.1.Схема дифракционного отражения.

6. Состав и характеристики атомного ядра. Нуклоны. Энергия связи нуклонов в ядре.

Постулаты Бора – основные допущения, сформулированные Нильсом Бором в 1913 году для объяснения закономерности линейчатого спектра атома водорода и водородоподобных ионов (формула Бальмера-Ридберга) и квантового характера испускания и поглощения света. Бор исходил из планетарной модели атома Резерфорда.

Постулаты:

1. Атом может находиться только в особенных стационарных или квантовых состояниях, каждому из которых отвечает определенная энергия. В стационарном состоянии атом не излучает электромагнитных волн;
2. Излучение света происходит при переходе атома из стационарного состояния с большей энергией в стационарное состояние с меньшей энергией. Энергия, излученного фотона, равна разности энергий стационарных состояний.

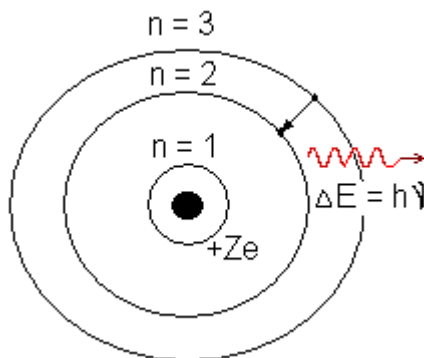


Рис. 93 – Модель атома Бора

Для получения энергетических уровней в атоме водорода в рамках модели Бора записывается второй закон Ньютона для движения электрона по круговой орбите в поле кулоновской силы притяжения:

$$\frac{m\vartheta^2}{r} = \frac{Zke^2}{r^2}, \quad (4.38)$$

где m – масса электрона, e – его заряд, Z – заряд ядра и k – кулоновская константа, зависящая от выбора системы единиц

В 1911 году Резерфорд в своём докладе «Рассеяние α - и β -лучей и строение атома» в философском обществе Манчестера заявил:

«Рассеяние заряженных частиц может быть объяснено, если предположить такой атом, который состоит из центрального электрического заряда, сосредоточенного в точке и окружённого однородным сферическим распределением противоположного электричества равной величины. При таком устройстве атома α - и β -частицы, когда они проходят на близком расстоянии от центра атома, испытывают большие отклонения, хотя вероятность такого отклонения мала».

Таким образом, Резерфорд открыл атомное ядро, с этого момента и ведёт начало ядерная физика, изучающая строение и свойства атомных ядер.

После обнаружения стабильных изотопов элементов, ядру самого лёгкого атома была отведена роль структурной частицы всех ядер. С 1920 года ядро атома водорода имеет официальный термин – *протон*. После промежуточной протон-электронной теории строения ядра, имевшей немало явных недостатков, в первую очередь она противоречила экспериментальным результатам измерений спинов и магнитных моментов ядер, в 1932 году Джеймсом Чедвиком была открыта новая электрически нейтральная частица, названная *нейтроном*. В том же году Иваненко и, независимо, Гейзенберг выдвинули гипотезу о протон-нейтронной структуре ядра. Эта гипотеза была полностью подтверждена всем последующим ходом развития ядерной физики и её приложений.

Ядро атома состоит из *нуклонов* (от лат. *nucleus* – ядро): положительно заряженных *протонов* p^+ и электронейтральных *нейтронов* n^0 . Нуклоны относятся к семейству *барионов* (группа N-барионов). Они являются самыми лёгкими из известных барионов.

Как уже говорилось ранее, *нейтрон* не имеет электрического заряда. *Протон* имеет положительный электрический заряд, равный по абсолютной величине заряду электрона. Об этом свидетельствует тот факт, что атомы нейтральны. Масса протона m_p точно известна из непосредственных масс-спектроскопических измерений; ее величина в 1836 раз больше массы электрона. Энергия покоя протона равна 938 Мэв. Масса нейтрона m_n известна из масс-спектроскопических измерений массы дейтона (который состоит из одного протона и одного нейтрона) и из измерения энергии связи этой частицы. Величина массы нейтрона немного превышает массу протона. Соответствующая разница между энергиями покоя нейтрона и протона порядка 1,3 Мэв.

Атомы классифицируются по количеству протонов и нейтронов в ядре: число протонов Z соответствует порядковому номеру атома в периодической системе Менделеева и определяет его принадлежность к некоторому химическому элементу, а число нейтронов N – определённому изотопу этого элемента. Число Z также определяет суммарный положительный электрический заряд (Ze) атомного ядра и число электронов в нейтральном атоме, задающее его размер.

Почти вся масса атома заключена в его ядре. Масса ядра складывается из масс всех нуклонов, входящих в ядро. Сумма протонов Z и нейтронов N ядра равна массовому числу атома, т.е. целому числу A , ближайшему к атомной массе (выраженной в а.е.м. – атомная единица массы (за а.е.м. принята 1/12 массы изотопа углерода C^{12})): $Z + N = A$. По массовому числу и атомному номеру химического элемента можно непосредственно определять число протонов и нейтронов, содержащихся в атомном ядре этого элемента.

Атомные ядра химических элементов принято обозначать символом ${}_Z^AX$, где X – символ элемента, A – массовое число, Z – атомный номер. Например: ${}_2^4He$ означает атомное ядро гелия, в котором содержится 2 протона и $4-2=2$ нейтрона.

Атомы, ядра которых состоят из одинакового числа протонов, но из различного числа нейтронов, называются *изотопами*. Так, у водорода имеется четыре изотопа: протий (H), дейтерий (D), тритий (T) и четырехнуклонный водород, не получивший пока специального названия.

Ядра – образования устойчивые \Rightarrow действуют силы, удерживающие нуклоны внутри ядра. Данные силы называют *ядерными*. *Ядерные силы* – силы, с которыми взаимодействуют нуклоны в ядре, препятствующие кулоновским силам отталкивания. В ядре имеет место гравитационное притяжение, но оно в 10^{36} раз меньше кулоновских сил отталкивания \Rightarrow это силы особой природы.

Свойства ядерных сил:

1. Являются *силами притяжения*;
2. *Короткодействующие* ($R \sim 10^{-15} \text{ м}$);
3. *Зарядовая независимость*. Ядерные силы действуют между двумя протонами или между протоном и нейтроном одинаково;

4. *Свойство насыщения.* Любой нуклон взаимодействует только с ограниченным числом ближайших к нему нуклонов, а не со всеми нуклонами ядра;

5. *Обратимость.* При уменьшении расстояния между нуклонами проявляют себя, как силы отталкивания.

6. Ядерные силы *не являются центральными*, т.е. действующим по линии, соединяющий центры взаимодействующих нуклонов.

Перечисленные свойства говорят о невероятной сложности ядерных сил. До сих пор не существует законченной теории о природе данного вида сил. Поэтому на данной стадии прибегают к рассмотрению приближенных ядерных моделей, в которых ядро заменяется некоторой модельной системой, довольно хорошо описывающей только определенные свойства ядра (например, *капельная, оболочечная*).

На опыте установлено, что масса любого ядра меньше суммы масс нуклонов его составляющих:

$$m_{\text{я}} < Zm_p + (A - Z)m_n \quad (4.41)$$

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m_{\text{я}} \quad (4.42)$$

Выражение (4.42) называют *дефектом массы ядра*.

Как уже отмечалось, нуклоны прочно связаны в ядре атома ядерными силами. Для разрыва этой связи, т.е. для полного разобщения нуклонов, необходимо затратить некоторое количество энергии. Энергия, необходимая для разобщения нуклонов, составляющих ядро, называется *энергией связи ядра*.

$$E_{\text{св}} = \Delta mc^2, \quad (4.43)$$

где c – скорость света в вакууме.

Энергия связи ядра, приходящаяся на один нуклон, называется *удельной энергией связи ядра* ε :

$$\varepsilon = E_{\text{св}}/A \quad (4.44)$$

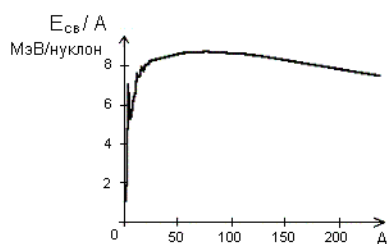


Рис. 94 – Зависимость удельной энергии связи ядра от массового числа

Энергия связи ядра водорода равна нулю, т.к. нечего разобщать. Удельная энергия связи максимальна у ядер ≈ 100 а.е.м. У легких ядер с увеличением A , энергия связи ядра возрастает \Rightarrow при слиянии легких ядер в тяжелые, энергия выделяется (*синтез*). При делении тяжелых ядер, энергия выделяется.

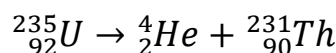
7. Явление радиоактивности. Закон радиоактивного распада. Альфа, бета и гамма-излучения. Их свойства. Биологическое действие ионизирующих излучений.

Стабильными называются ядра, состав которых со временем не меняется. Наиболее устойчивыми являются ядра легких элементов, состоящие из приблизительно одинакового числа протонов и нейтронов. У самых тяжелых элементов (расположенных в периодической таблице после свинца), ядра которых состоят из большого числа нуклонов (с преобладанием нейтронов), ядерные силы уже не обеспечивают устойчивости ядра. Такие ядра могут *самопроизвольно* распадаться, превращаясь в ядра более легких элементов. Это явление носит название *естественной радиоактивности* (была открыта в 1896 г. французским физиком Беккерелем). Своим открытием Беккерель делится с учёными, с которыми он сотрудничал. В 1898 г. Мария Кюри и Пьер Кюри обнаружили радиоактивность тория, позднее ими были открыты радиоактивные элементы полоний и радий. Они выяснили, что свойством естественной радиоактивности обладают все соединения урана и в наибольшей степени сам уран.

Рассмотрим несколько случаев типичной нестабильности (неустойчивости). В него входят три различных вида излучения – α , β , γ – лучи.

1. α – *распад* – самопроизвольное превращение ядра с испусканием α частицы (${}^4_2\text{He}$). Энергетический спектр – линейчатый.

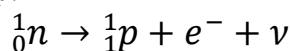
Пример:



В результате получается химический элемент, со смещением влево на две клетки в периодической таблице Д.И. Менделеева. При α – распаде, почти мгновенно испускаются несколько γ – квантов. Испускаемые α и γ – лучи определенные \Rightarrow спектр линейчатый.

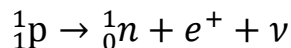
2. β – распад.

а) электронный β – распад. Пример:



В результате получается химический элемент, со смещением вправо на одну клетку в периодической таблице Д.И. Менделеева ($Z+1$).

б) позитронный β – распад. Пример:



В результате получается химический элемент, со смещением влево на одну клетку в периодической таблице Д.И. Менделеева ($Z-1$).

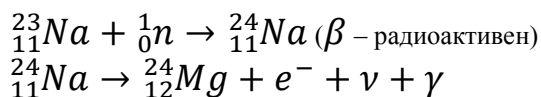
При β – распаде энергетический спектр сплошной.

3. Термин «гамма-распад» применяется редко; испускание ядром гамма-квантов называют обычно *изомерным* переходом. Гамма-излучение часто сопровождает другие типы распада, когда в *результате* первого этапа распада возникает дочернее ядро в возбуждённом состоянии, затем испытывающее переход в основное состояние с испусканием гамма-квантов.

Искусственная радиоактивность – радиоактивность изотопов, полученных в результате ядерной реакции.

Ядерная реакция – процесс превращения атомных ядер, обусловлен-ный воздействием на них быстрых элементарных частиц (или ядер других атомов).

Любое стабильное ядро можно сделать искусственно радиоактивным, если вогнать в него избыточную частицу. Впервые это удалось Ф.Ж. Кюри в 1934 г. У легких ядер массовое число меньше пятидесяти ($A < 50$), если у них искусственно создать избыток нейтронов над протонами, то такие ядра становятся β – радиоактивными. Чаще всего для этой цели используют нейтрон, поскольку ему легче проникнуть в ядро (нет заряда).



В настоящее время известно более 1000 искусственных изотопов.

Для количественной характеристики воздействия ядерного излучения на организм используют *дозу излучения*. *Поглощенная доза излучения* – величина, равная отношению энергии излучения, переданной веществу к массе этого вещества. В СИ 1Гр(грэй) = 1 Дж/кг.

Разные виды излучения при одной дозе излучения могут вызвать разные биологические действия \Rightarrow вводят *коэффициент качества* – во сколько раз данное излучение действует сильнее β, γ излучений.

Коэффициент качества умножают на дозу излучения получают *эквивалентную дозу излучения*. В СИ Зв (зиверт). 1 Зв – это излучение любого вида, действие которого на живую ткань эквивалентно действию 1 Гр.

Радиоактивный распад ведет к постепенному уменьшению числа атомов радиоактивного элемента. Он носит случайный характер в том смысле, что нельзя предсказать, когда и какой именно атом распадётся. Можно говорить только о *вероятности распада* каждого атома за определенный промежуток времени.

Число атомов dN , распадающихся за время dt пропорционально времени и числу атомов радиоактивного элемента:

$$dN = -\lambda N dt,$$

где λ – коэффициент пропорциональности, называемый *постоянной распада* данного элемента. Знак «минус» показывает уменьшение числа атомов радиоактивного элемента со временем.

$$\begin{aligned} \int_{N_0}^N dN &= - \int_0^t \lambda N dt \\ \int_{N_0}^N \frac{dN}{N} &= -\lambda \int_0^t dt \\ N &= N_0 e^{-\lambda t}, \end{aligned} \tag{4.45}$$

где N_0 – число атомов в начальный момент времени; N – число атомов по истечении времени t .
Выражение (4.45), называется *законом радиоактивного распада*.

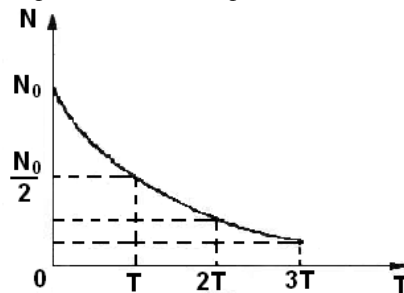


Рис. 95 – Закон радиоактивного распада

Для характеристики быстроты распада радиоактивного элемента вводится понятие периода полураспада. *Периодом полураспада T* называется время в течение которого количество атомов исходного элемента уменьшается вдвое.

$$e^{-\lambda T} = 1/2 \Rightarrow T = \ln 2 / \lambda = 0,693 / \lambda \quad (4.46)$$

Величина τ , обратно пропорциональная постоянной распада, представляет *среднее время жизни* радиоактивного атома:

$$\tau = 1/\lambda \Rightarrow T = \tau \cdot \ln 2$$

Откуда:

$$\tau = T / \ln 2 = 1,44T \quad (4.47)$$

Таким образом, среднее время жизни приблизительно в полтора раза больше периода полураспада.

$$N_t = N_0 e^{-\lambda t}$$

$t=T$

$$N_t = N_0 e^{-\lambda T}$$

$$1/2 N_0 = N_0 e^{-\lambda T}$$

$$\ln 2 = \lambda T$$

$$\lambda = \ln 2 / T$$

$$N_t = N_0 e^{-\ln 2 t / T}$$

$$N_t = N_0 2^{-t/T} \quad (4.48)$$

Формула (4.48) ещё одна запись закона радиоактивного распада.

Число атомных распадов, совершающихся в радиоактивном элементе за 1 с, называется *активностью a* этого элемента:

$$a = |dN/dt| \quad (4.49)$$

$$a = \lambda N = N \ln 2 / T \quad (4.50)$$

Таким образом, активность пропорциональна количеству элемента и обратно пропорциональна периоду. За единицу активности принята активность 1г радия, получившая название *кюри*:

$$1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ расп/с}$$

8. Биологическое действие ионизирующих излучений.

Различают два вида эффекта воздействия на организм ионизирующих излучений: соматический и генетический. При соматическом эффекте последствия проявляются непосредственно у облучаемого, при генетическом – у его потомства. Соматические эффекты могут быть ранними или отдалёнными. Ранние возникают в период от нескольких минут до 30-60 суток после облучения. К ним относят покраснение и шелушение кожи, помутнение хрусталика глаза, поражение кроветворной системы, лучевая болезнь, летальный исход. Отдалённые соматические эффекты проявляются через несколько месяцев или лет после облучения в виде стойких изменений кожи, злокачественных новообразований, снижения иммунитета, сокращения продолжительности жизни.

При изучении действия излучения на организм были выявлены следующие особенности: Высокая эффективность поглощённой энергии, даже малые её количества могут вызвать глубокие биологические изменения в организме.

Наличие скрытого (инкубационного) периода проявления действия ионизирующих излучений. Действие от малых доз может суммироваться или накапливаться. Генетический эффект - воздействие на потомство. Различные органы живого организма имеют свою чувствительность к облучению. Не каждый организм (человек) в целом одинаково реагирует на облучение. Облучение зависит от частоты воздействия. При одной и той же дозе облучения вредные последствия будут тем меньше, чем более дробно оно получено во времени.

Ионизирующее излучение может оказывать влияние на организм как при внешнем (особенно рентгеновское и гамма-излучение), так и при внутреннем (особенно альфа-частицы) облучении. Внутреннее облучение происходит при попадании внутрь организма через лёгкие, кожу и органы пищеварения источников ионизирующего излучения. Внутреннее облучение более опасно, чем внешнее, так как попавшие внутрь ИИИ подвергают непрерывному облучению ничем не защищённые внутренние органы.

Под действием ионизирующего излучения вода, являющаяся составной частью организма человека, расщепляется и образуются ионы с разными зарядами. Полученные свободные радикалы и окислители взаимодействуют с молекулами органического вещества ткани, окисляя и разрушая её. Нарушается обмен веществ. Происходят изменения в составе крови - снижается уровень эритроцитов, лейкоцитов, тромбоцитов и нейтрофилов. Поражение органов кроветворения разрушает иммунную систему человека и приводит к инфекционным осложнениям.

Местные поражения характеризуются лучевыми ожогами кожи и слизистых оболочек. При сильных ожогах образуются отёки, пузыри, возможно отмирание тканей (некрозы).

Смертельные	поглощённые	дозы	для	отдельных	частей	тела	следующие:
голова		-			20		Гр;
нижняя	часть		живота		-	50	Гр;
грудная		клетка			-100		Гр;
конечности - 200 Гр.							

При облучении дозами, в 100-1000 раз превышающую смертельную дозу, человек может погибнуть во время облучения ("смерть под лучом").

Биологические нарушения в зависимости от суммарной поглощённой дозы излучения представлены в (табл. 3.4).

В зависимости от типа ионизирующего излучения могут быть разные меры защиты: уменьшение времени облучения, увеличение расстояния до источников ионизирующего излучения, ограждение источников ионизирующего излучения, герметизация источников ионизирующего излучения, оборудование и устройство защитных средств, организация дозиметрического контроля, меры гигиены и санитарии.

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 используя теорему

Штейнера

2.1.2 Задачи работы:

1. Применить теорему Штейнера на практике
2. Ознакомиться с понятием момента инерции твердого тела.

2.1.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

штатив с отвесом и горизонтальной осью, секундомер, шатун, крючки с нитями, масштабная линейка

2.1.4 Описание (ход) работы:

1. Значение массы шатуна выбито на шатуне в граммах. По этому значению вычислить вес шатуна в Ньютонах в положении равновесия.
2. Отметить на шатуне центр тяжести O . Для этого шатун подвесить на крючках так, как показано на рис. 1 а. Положение центра тяжести определится как точка пересечения отвесной линии с осью симметрии шатуна.

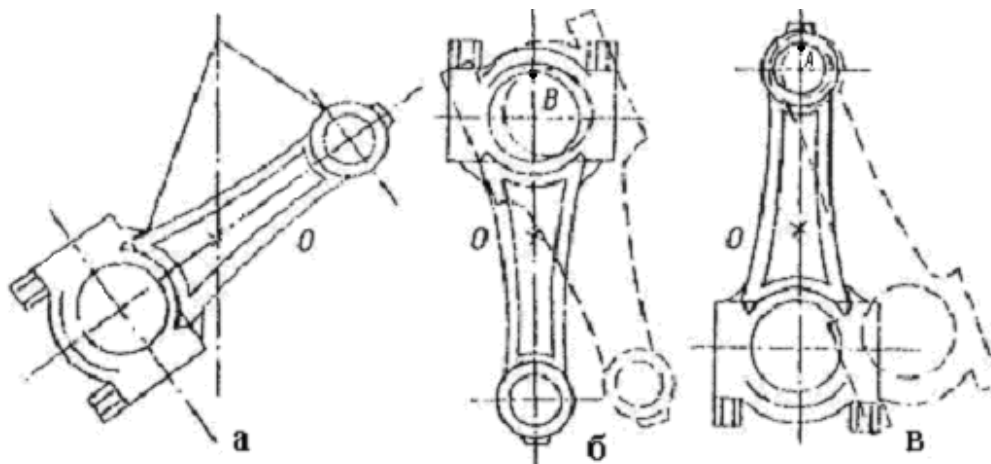


Рис. 1

3. Подвесить шатун так, как показано на рис. 1 б (ось вращения шатуна проходит через точку В) и, определив время десяти колебаний, найти период колебания шатуна T_B относительно оси, проходящей через точку В (шатун отклоняется от положения равновесия на $3-5^\circ$) $\left(T_B = \frac{t}{10}\right)$.

4. Измерить масштабной линейкой расстояние $r_{BO} = BO$.

5. Вычислить момент инерции шатуна относительно оси, проходящей через точку В (J_B) по формуле (2).

6. Подвесить шатун так, как это показано на рис. 1 в (ось вращения шатуна проходит через точку А), и аналогично описанному выше определить период колебаний шатуна (T_A), расстояние $r_{AO} = AO$ и вычислить момент инерции шатуна относительно оси, проходящей через точку А (J_A).

7. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу.

	m	p	n	t	T	r	J	J_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 № 19.1 (2 часа).

Тема: «Определение ускорения свободного падения тел с помощью математического маятника»

2.2.1 Цель работы: Рассчитать ускорения свободного падения тел методом математического маятника

2.2.2 Задачи работы:

1. Ознакомиться с видами колебаний и их характеристиками
2. Расчет ускорения свободного падения

2.2.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

математический маятник переменной длины, секундомер, вертикальная шкала

2.4.4 Описание (ход) работы:

1. Определяют с помощью секундомера время 20 полных колебаний маятника и вычисляют период колебания маятника $T_1 = \frac{t_1}{N}$. Отмечают положение нити на шкале ℓ_1 (рис. 1).
2. Поднимают шарик на 15-20 см. По шкале определяют новое положение нити ℓ_2 .
Определяют $T_2 = \frac{t_2}{N}$ (разность отсчетов по шкале дает $\ell_2 - \ell_1$).
3. Вычисляют ускорение свободного падения по формуле (1.1). Вычисление ускорения свободного падения проводят не менее трех раз, используя при этом маятники различной длины.
4. Результаты измерений заносят в таблицу.

№ п/п	Число колебаний N	Время совершения колебаний t	Период колебания T	$(\ell_2 - \ell_1)$	g
Для длины ℓ_1					
Для длины ℓ_2					

5. Находят абсолютную и относительную погрешности вычисления ускорения свободного падения.

2.3 Лабораторная работа № 21.1 (2 часа).

Тема: «Изучение законов свободных колебаний упругодеформированного тела»

2.3.1 Цель работы: Определить коэффициент жесткости пружины различными способами

2.3.2 Задачи работы:

1. Определить коэффициент жесткости пружины по колебаниям
2. Определить коэффициент жесткости пружины по деформациям

2.3.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

кронштейн с пружиной и со шкалой, набор грузов, секундомер.

2.3.4 Описание (ход) работы:

Задание 1. Изучение зависимости смещения пружинного маятника от величины деформирующей силы.

1. Укрепить на стойке кронштейн с пружиной так, чтобы стрелка указателя была при ненагруженной пружине в высшей точке шкалы. Отметить положение стрелки указателя на шкале (рис.).
2. Навесить на пружину один груз, записать в таблицу его массу и снова отметить положение стрелки на шкале. По разности показаний по шкале определить смещение x_1 , под действием данного груза m_1 .
3. Навешивая на пружину 2, 3 и т.д. грузы, записать в таблицу массы их и соответствующие смещения.

№ п/п	m	F	x	k	k_{cp}

4. По результатам опытов построить график зависимости деформирующей силы от смещения $F=f(x)$.
5. Вычислить величину $k = mg/x$, а затем рассчитать k_{cp} .

Задание 2. Изучение зависимости периода колебаний пружинного маятника от его массы.

1. Слегка оттянуть пружину с грузом и отпустить. С помощью секундомера определить время 20 полных колебаний маятника и рассчитать период колебания $T_1 = \frac{t_1}{20}$.
2. Прodelать то же самое, навешивая 2 груза вместе, затем 3 груза и т.д.

№ п/п	m	n	t	T
1.				
2.				
3.				

3. Поданным опыта построить график зависимости периода T колебаний груза от его массы m ($T=f(m)$).

Задание 3. По формуле $k' = \omega^2 m = \frac{4\pi^2 m}{T^2}$ рассчитать значение k' для 3-х нагрузок и вычислить k'_{cp} . Полученное значение k'_{cp} сравнить со значением k_{cp} , рассчитанным по деформации.

Расчет по колебаниям			Расчет по деформации	
m	$k' = \frac{4\pi^2 m}{T^2}$	k'_{cp}	$k = \frac{mg}{x}$	k_{cp}

2.4 Лабораторная работа № 20.1 (2 часа).

Тема: «Изучение затухающих колебаний»

2.4.1 Цель работы: Изучить затухающие колебания с помощью физического маятника

2.4.2 Задачи работы:

1. Вычислить декременты затухания с грузом и без него

2. Вычислить коэффициент затухания

2.4.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

маятник с диском и грузами, шкала, секундомер.

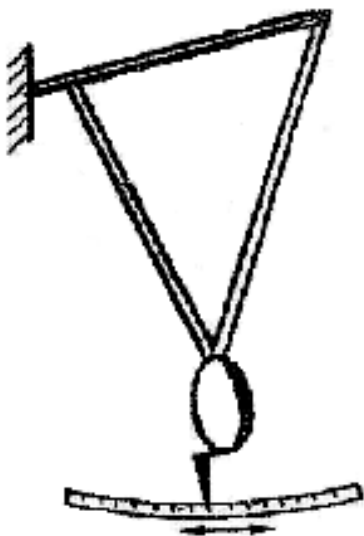
2.4.4 Описание (ход) работы:

Изучение законов затухающих колебаний в данной работе производится на установке, состоящей из маятника с диском, подвешенным на специальном кронштейне (см. рис.). На установке укреплен шкала. Грузы устанавливаются в центре с помощью винта. Указатель маятника, находящегося в положении равновесия, устанавливается против нулевого деления шкалы.

1. Исследовать, зависит ли период колебания маятника от его массы, для этого определить периоды колебаний маятника, отклоняя его на максимальную амплитуду, и измерить время 10 полных колебаний с грузом t_1 , и без груза t_2 . Из этих измерений

$$\text{определить } T_1 = \frac{t_1}{10}; T_2 = \frac{t_2}{10}.$$

Сравнить значения T_1 и T_2 . Сделать вывод.



2. Установить зависимость амплитуды колебания от времени. Для этого отклонить маятник до крайнего деления шкалы (50 делений) и отпустить его, записать значения десяти амплитуд, наблюдая положение указателя маятника по одну сторону от нулевого деления шкалы. Опыт удобнее проводить вдвоем: один студент фиксирует положение указателя маятника, стараясь избежать параллакса, а другой в это время заносит полученные данные в таблицу; делают измерения для двух случаев: без груза, с грузом.

	Амплитуда										Т	k_{cp}	λ	δ
	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9	A_{10}				
без груза с грузом														

3. Вычислить декременты затухания для двух случаев: с грузом и без груза, используя формулу (4); рассчитать их средние значения (k_{1cp} и k_{2cp}).

4. Вычислить логарифмические декременты затухания, пользуясь значениями k_{cp} (по формуле 5).

5. Вычислить коэффициенты затухания δ по формуле (6) и проанализировать зависимость их от массы маятника (значение периода колебания маятника определено в п. 1).

6. Построить графики, иллюстрирующие зависимость амплитуды колебания маятника (без груза и с грузами) от времени. Для удобства сравнения рекомендуется вычерчивать их в одной системе координат, а значения начальных амплитуд колебаний маятника без грузов и с грузами совместить.

2.5 Лабораторная работа № 15.1 (2 часа).

Тема: «Изучение закона сохранения и превращения механической энергии при движении тела по наклонной поверхности»

2.5.1 Цель работы: Расчетным и экспериментальным путем установить скорость скатывания с наклонной поверхности шарика и цилиндра

2.5.2 Задачи работы:

1. Расчетным путем установить скорость скатывания с наклонной поверхности шарика и цилиндра
2. Экспериментальным путем установить скорость скатывания с наклонной поверхности шарика и цилиндра

2.5.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

наклонная плоскость, откидная подставка для определения дальности полета, набор тел, линейка, весы с разновесом.

2.5.4 Описание (ход) работы:

1. Взвешиванием определить массу цилиндра (m).
2. Измерить диаметр d штангенциркулем.
3. Вычислить момент инерции цилиндра по формуле $J_{ц} = \frac{mR^2}{2}$, R - радиус цилиндра.
4. Измерить высоту наклонной плоскости H .
5. По формуле (1.2) вычислить предполагаемую скорость цилиндра у основания наклонной плоскости.
6. Поднять цилиндр до верхней точки наклонной плоскости и отпустить, предоставив ему возможность свободно катиться.
7. Измерив линейкой высоту падения цилиндра h и дальность полета S , определить скорость цилиндра по формуле (3). Высота падения тела измеряется линейкой. Для определения дальности полета на подставку положить лист чистой бумаги и сверху лист копировальной. Место падения определяется по отпечатку.
8. Вместо цилиндра взять шарик и проделать те же измерения и вычисления. Момент инерции шара определяется по формуле: $J_{ш} = \frac{2}{5} mR^2$.
9. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу.

Форма тела	m	R	J	H	$v_{теор.}$	h	S	b	$v_{эсп.}$
цилиндр шар									

10. Сделать вывод.

Замечание: масса шара и цилиндра указывается при выдаче приборов; диаметры шара и цилиндра находятся штангенциркулем.

2.6 Лабораторная работа № 7.2 (2 часа).

Тема: «Определение коэффициента вязкости жидкости методом Стокса»

2.6.1 Цель работы: ознакомиться с устройством прибора Стокса и определить коэффициент вязкости масла (подсолнечного, трансформаторного, машинного).

2.6.2 Задачи работы:

1. Ознакомиться с устройством прибора Стокса

2. Определить коэффициент вязкости масла

2.6.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

прибор Стокса, ареометр, пипетка, исследуемая жидкость (масло).

2.6.4 Описание (ход) работы:

Прибор Стокса представляет собой цилиндр, наполненный исследуемой жидкостью с двумя кольцевыми метками **М** и **Н**, которые могут перемещаться вдоль цилиндра.

Телами шарообразной формы служат капли воды, выпускаемые пипеткой на поверхность исследуемой жидкости. Верхняя кольцевая метка **М** устанавливается на расстоянии **6-8 см** от поверхности жидкости, чтобы шарик, приближаясь к кольцу, приобрел постоянную скорость. *Рассчитайте, через какое время движение капли воды станет равномерным, и какой путь пройдет капля.*

Расстояние между метками **М** и **Н** делают не менее **0,3 м**. Секундомер включается и выключается в момент прохождения шариком верхней и нижней меток.

Опыт повторяют не менее трех раз при одинаковом расстоянии между метками. Плотность воды и плотность масла находят ареометром, а затем сравнивают со значениями в справочнике.

По данным опыта вычисляют коэффициент вязкости η .

Результаты измерений и вычислений заносят в таблицу.

№	r, мм	S, м ²	t, с	ρ , кг/м ³	ρ_1 , кг/м ³	η , Па*с	$\eta_{\text{ср}}$, Па*с
1							
2							
3							

Значение радиуса шарика указано на установке.

Сформулируйте вывод по данной работе.

2.7 Лабораторная работа № 2.5 (2 часа).

Тема: «Цикл Карно»

2.7.1 Цель работы: Выяснить с помощью компьютерной модели зависимость КПД цикла от температуры термостатов

2.7.2 Задачи работы:

1. Пронаблюдайте экспериментальные графики изотермического и адиабатного процессов при различных температурах

2. Ознакомьтесь с описанием компьютерной модели «Цикл Карно»

3. Рассчитать приращение энтропии

2.7.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:




компьютер

2.7.4 Описание (ход) работы:

Задание 1. Изотерма и адиабата.

1. Ознакомьтесь с описанием компьютерной модели «Изотерма и адиабата».
2. Пронаблюдайте экспериментальные графики изотермического и адиабатного процессов при различных температурах.

Задание 2. Определение зависимости КПД цикла Карно от температур нагревателя и охладителя.

1. Запустите программу «Молекулярная физика».
2. Ознакомьтесь с описанием компьютерной модели «Цикл Карно».
3. Нажмите кнопку ПУСК. Определите по строке параметров температуру нагревателя T_1 .
4. Установите температуру $T_1=380\text{К}$. Для этого нажмите кнопку «ИЗМЕНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР» «», затем «». Если исходная температура ниже 380К, то перейдите с помощью клавиш клавиатуры к выше лежащей изотерме. Подтвердите свой выбор нажатием клавиши ENTER.
5. Аналогично установите температуру $T_2=220\text{К}$.
6. Нажмите кнопку «». Зарисуйте цикл Карно в координатах $p - V$. Дождитесь пока модель завершит цикл и зарисуйте его в осях $S - T$, где S – энтропия.
7. Занесите в таблицу значение работы A , совершенной за цикл, количества теплоты Q_1 , полученного от нагревателя и КПД машины. (Рис. 1)

$T_1 = 340^\circ$	$U_1 = 15$
$T_2 = 220^\circ$	$U_2 = 23$
$A=16 \quad Q=47 \quad \eta=0.35$	

Рис. 1

8. Вычислите приращение энтропии ΔS , полученное при изотермическом расширении по формуле $\Delta S = \frac{Q_1}{T_1}$.
9. Установите температуру $T_2=200\text{К}$, а затем 180К и выполните пункты № 6, №7 и № 8.
10. Сделайте вывод о зависимости КПД тепловой машины и приращения энтропии от температур нагревателя и холодильника.
11. Завершите работу программы.

$T_1 - T_2$ (К)	A , (Дж)	Q_1 , (Дж)	η (%)	ΔS , (Дж/К)

2.8 Лабораторная работа № 2.4 (2 часа).

Тема: «Явления переноса»

2.8.1 Цель работы: Ознакомление с явлениями переноса

2.8.2 Задачи работы:

1. Ознакомьтесь с описанием компьютерной модели «Диффузия газов»
2. Ознакомьтесь с описанием компьютерной модели «Теплопроводность»
3. Ознакомьтесь с описанием компьютерной модели «Вязкость»

2.8.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

компьютер

2.8.4 Описание (ход) работы:

Задание 1. Диффузия газов.

1. Ознакомьтесь с описанием компьютерной модели «Диффузия газов».
2. Выберите в меню кнопку «ПАРАМЕТРЫ ГАЗА» и установите число частиц $n_1 = 1$, $n_2 = 20$.

3. Выберите в меню кнопку «ДИФФУЗИЯ». Пронаблюдайте выравнивание концентраций молекул одного сорта в сосудах, связанных капиллярным отверстием.

Задание 2. Теплопроводность.

1. Ознакомьтесь с описанием компьютерной модели «Теплопроводность».
2. Выберите в меню кнопку ΔT и установите разность температур $\Delta T = -160$ К.
3. Выберите в меню кнопку «ГИСТОГРАММА». Пронаблюдайте на протяжении 35 приближений выравнивание температур слоев газа.
4. Сделайте вывод о характере распределения температур слоев газа.

Задание 3. Вязкость.

1. Ознакомьтесь с описанием компьютерной модели «Вязкость».
2. Выберите в меню нижней части экрана кнопку «ЭКСПЕРИМЕНТ», установите «**Поток газа**». Затем необходимо нажать кнопку «**Старт**» в том же меню.
3. Диаметр трубы $D_0 = 9$ мм, т.е. одно деление на оси ординат соответствует 1 мм. Одно деление на оси абсцисс соответствует 1 м/с. Измерьте не менее 5 раз значение приращения скорости Δv при переходе от слоя, расположенного на отметке $x_1 = 2$ мм, к слою, расположенному на отметке $x_2 = 3$ мм. (Рис. 1).

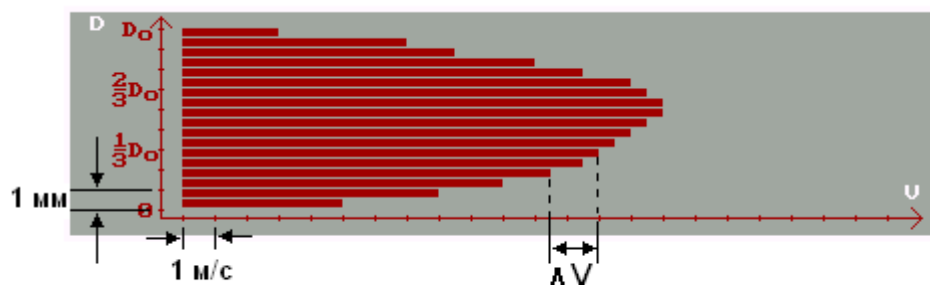


Рис. 1

4. Вычислите среднее значение приращения скорости $\Delta v_{\text{ср}}$. Определите градиент скорости: $\Delta v_{\text{ср}} / \Delta x$.
5. Рассчитайте вязкость азота по формуле (7), учитывая, что при нормальных условиях $l_{\text{ср}} = 10^{-9}$ м, $v_{\text{ср}} = 474$ м/с и $\rho = 10^{-3}$ кг/м³.
6. Вычислите по формуле (5) силу внутреннего трения, действующую на площадь соприкосновения слоев $S = 2 \cdot 10^{-4}$ (см²).
7. Сделайте вывод о проделанной работе.
8. Завершите работу программы.

2.9 Лабораторная работа № 2.6 (2 часа).

Тема: «Энтропия»

2.9.1 Цель работы: Убедиться на компьютерной модели в справедливости закона возрастания энтропии

2.9.2 Задачи работы:

1. Ознакомьтесь с описанием компьютерной модели «Энтропия»

2.9.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

компьютер

2.9.4 Описание (ход) работы:

1. Ознакомьтесь с описанием компьютерной модели «Энтропия».
2. Установите с помощью кнопки «ИЗМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ» $T_1 = 50$ К и $T_2 = 150$ К, 250 К, 350 К, 450 К.

3. Пронаблюдайте возрастание энтропии смеси по сравнению с суммой начальных энтропий двух газов при необратимом смешении газов.
4. Сделайте вывод о характере изменения энтропии газа при передаче ему тепла в изохорном процессе.

2.10 Лабораторная работа № 3.2 (2 часа).

Тема: «Последовательное и параллельное соединение проводников»

2.10.1 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.

2.10.2 Задачи работы:

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

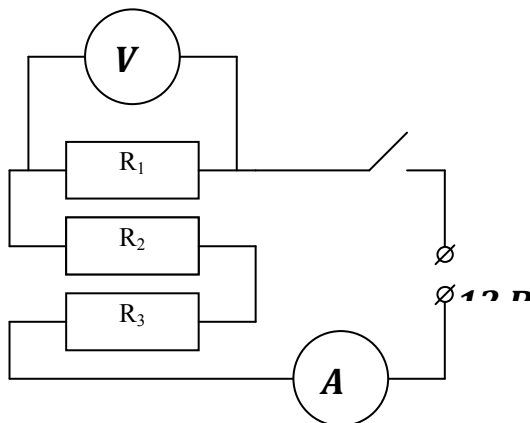
2.10.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1) амперметр, 2) вольтметр, 3) набор сопротивлений, 4) соединительные провода, 5) источник тока (12В).

2.10.4 Описание (ход) работы:

ЗАДАНИЕ 1:

1. Знакомятся с приборами, записывают основные технические характеристики измерительных приборов.
2. Определяют цену деления прибора, для многопредельных приборов определяют цену деления на каждом пределе.



3. Собирают схему (рис.3) последовательного соединения проводников.

Рис.3

Вольтметр подключается параллельно тому участку, где нужно измерить напряжение.

4. Присоединяя провода к зажимам сопротивлений измеряют падение напряжения на каждом сопротивлении и в общей цепи. Измеряют силу тока (ток во всех участках должен быть одинаков).

Примечание: показания амперметра записывают при отключенном вольтметре.

5. Убеждаются, что $U = U_1 + U_2 + U_3$ и

$$R_1 = R_1 + R_2 + R_3$$

$$\left(R_1 = \frac{U_1}{I}; R_2 = \frac{U_2}{I}; R_3 = \frac{U_3}{I}; R = \frac{U}{I} \right)$$

где P – общая мощность ($P = P_1 + P_2 + P_3$)

P_i - мощность, развиваемая на отдельных участках.

$$(P_1 = IU_1, P_2 = IU_2, P_3 = IU_3)$$

6. Результаты измерений и вычислений записывают в таблицу.

Таблица 1

Соединение	U(В)	I(А)	P(Вт)	R(Ом)
последовательное				
Сопротивление 1				
Сопротивление 2				
Сопротивление 3				
Вся цепь (данные опыта)				
Вся цепь (вычисления)				

ЗАДАНИЕ 2:

1. Собирают схему (рис.4) и измеряют общее напряжение и общую силу тока.

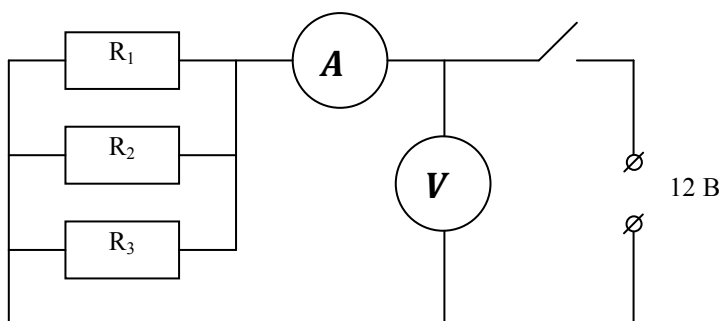


Рис.4

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

б)

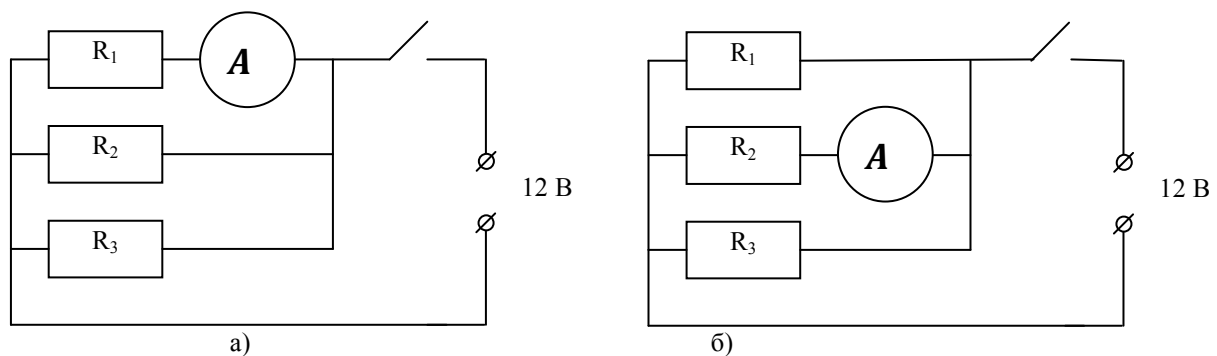


Рис.5

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 ($U_{06} = U_1 = U_2 = U_3$, $I_{06} = I_1 + I_2 + I_3$)

$$R_{\text{теор}} = R_{\text{эсп}}; \frac{1}{R_{\text{теор}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

5. Составляют отчет по работе и делают выводы.

2.11 Лабораторная работа № 3.1 (2 часа).

Тема: «Движение заряженной частицы в электрическом поле»

2.11.1 Цель работы: Определение удельного заряда электрона

2.11.2 Задачи работы:

1. Знакомство с моделью процесса движения заряда в однородном электрическом поле.
2. Определение удельного заряда электрона.

2.11.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:
компьютер

2.11.4 Описание (ход) работы:

1. Выберите раздел «Электричество». Нажмите кнопку с названием данной работы.
2. Нажмите «мышью» кнопку «Выбор». Подведите курсор «мыши» к вектору E и установите напряженность $E \geq 2 \text{ кВ/м}$.
3. Аналогичным способом установите $v_{ox} = 5 \cdot 10^6 \text{ м/с}$, $v_{oy} = 0 \text{ м/с}$. Нажав «Старт», наблюдайте движение частицы. Изменяя V_{ox} , подберите минимальное значение, при котором частица вылетает из конденсатора. Запишите значение длины пластины конденсатора $L(x)$.

4. Зарисуйте движение частицы и укажите вектор начальной скорости и ускорение движения частицы.
5. Верните модель в исходные начальные условия (E, v_{ox}, v_{oy}).
6. Нажмите «Старт» и проследите, чтобы электрон не вылетел из конденсатора. Если электрон «приземлился» на одной из пластин, то запишите в таблицу значения скорости v_{ox}, v_y и времени полета электрона t , полученные в ходе эксперимента. Если электрон вылетел из конденсатора, то измените величину начальной скорости, уменьшите или увеличьте напряженность поля и повторите опыт.
7. Используя формулу (4) рассчитайте ускорение электрона.
8. Вычислите величину удельного заряда $\frac{q}{m}$, выразив ее из формулы (2).
9. Повторите пункты 6 ÷ 8 не менее пяти раз, изменяя каждый раз значение скорости v_{ox} . Данные занесите в таблицу 1.
10. Вычислите среднее арифметическое значение величины удельного заряда и сравните с табличным значением удельного заряда электрона ($q = -1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг), рассчитайте ε_1 .
11. Постройте график зависимости составляющей скорости v_y на вылете из конденсатора от обратной начальной скорости ($v_y = f(\frac{1}{v_{ox}})$).
12. Определите по наклону графика экспериментальное значение удельного заряда частицы, используя формулу:

$$\frac{q}{m} = \frac{1}{EL} \cdot \frac{\Delta(v_y)}{\Delta(\frac{1}{v_{ox}})}$$

13. Определите относительную погрешность результатов измерения ε_2 .

$$\varepsilon = \frac{|N_{\text{тбл}} - N_{\text{эксп}}|}{N_{\text{тбл}}} \cdot 100\%$$

14. Сформулируйте вывод по работе.

Таблица 1

№	$v_{ox}, (\frac{м}{с})$	$E, (\frac{В}{м})$	$v_y, (\frac{м}{с})$	$t, (с)$	$a, (\frac{м}{с^2})$	$\frac{q}{m},$ ($\frac{Кл}{кг}$)	$\frac{q}{m} \text{ ср.},$ ($\frac{Кл}{кг}$) I	$\frac{q}{m},$ ($\frac{Кл}{кг}$) II	ε_1 (%)	ε_2 %
1										
2										
3										
4										
5										

2.12 Лабораторная работа № 3.5 (2 часа).

Тема: «Движение заряженной частицы в магнитном поле»

2.12.1 Цель работы: Сделать вывод о характере движения частицы в магнитном поле в зависимости от ее скорости и величины магнитного поля

2.12.2 Задачи работы:

1. Сделайте вывод о связи между величиной и направлением силы тока и густотой силовых линий, а также о вихревом характере магнитного поля

2. Рассчитайте силу, действующую на электрон в магнитном поле

2.12.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

компьютер

2.12.4 Описание (ход) работы:

Задание 1.

В пункте меню «Магнитное поле» выберите последовательно «Два провода», «Соленоид» и «Тороид». Устанавливая сначала одинаковые, а затем различные по направлению силы тока, зарисуйте картину силовых линий магнитного поля для каждого случая.

Сделайте вывод о связи между величиной и направлением силы тока и густотой силовых линий, а также о вихревом характере магнитного поля.

Задание 2.

1. В пункте меню «Движение заряженной частицы в магнитном поле» выберите любое место старта частицы, и по направлению движения частицы в магнитном поле с помощью правила левой руки определите знак ее заряда.
2. Установите место старта частицы *из центра* магнита, выберите любую величину магнитной индукции \vec{B} и скорости частицы, и такое направление скорости частицы, при котором она совершает в однородном магнитном поле равномерное движение по окружности.

Указание: чтобы установить или изменить величину магнитного поля \vec{B} , нажмите кнопку «ПОЛЕ» (курсор мыши появится около синей стрелки, показывающей направление магнитного поля), измените длину вектора \vec{B} (сжимая или растягивая синюю стрелку). Аналогично можно изменить длину вектора скорости \vec{v} , нажав кнопку «СКОРОСТЬ».

3. Измерьте линейкой на экране монитора диаметр окружности в сантиметрах, тогда радиус $R = \frac{D}{2} \cdot 10^{-2} \text{ м}$.
4. Измерьте линейкой на экране монитора длину k вектора скорости в миллиметрах, тогда $v = k \cdot 10^6 \text{ м/с}$. Считая заряженную частицу электроном, вычислите величину магнитной индукции, выразив вектор магнитной индукции B из формулы (3). Заряд электрона $q = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$, масса электрона $m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$.
5. По формуле (4) рассчитайте период обращения T электрона в однородном магнитном поле.
6. Рассчитайте силу, действующую на электрон в магнитном поле по формуле $F_e = qvB$.
7. Повторите пункты 2÷6 не менее чем для трех различных длин вектора скорости, изменяя для каждого случая величину магнитного поля.
8. Заполните отчетную таблицу:

№	$D, \text{см}$	$R, \text{м}$	$k, \text{мм}$	$v, \text{м/с}$	$B, \text{Тл}$	$T, \text{с}$	$F_{\text{л}}, \text{Н}$
1.							
2.							
3.							
4.							

9. Сделайте вывод о характере движения частицы в магнитном поле в зависимости от ее скорости и величины магнитного поля.

2.13 Лабораторная работа № 4.2 (2 часа).

1.1 Тема: «Интерференция, поляризация света»

2.13.1 Цель работы: Определение длины волны света по интерференционной картине

2.13.2 Задачи работы:

1. Проверка закона Малюса
2. Определить длину волны света по интерференционной картине

2.13.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

компьютер

2.13.4 Описание (ход) работы:

Задание №1.

1. Откройте работу «Волновая оптика на компьютере» (папка «Fizika2», файл «Optics»), пункт меню «Интерференция», «Двулучевая интерференция».
2. Соотношение интенсивностей падающих волн установить как $I_1 : I_2 = 1 : 1$, в процессе работы не изменять этот параметр.
3. С помощью кнопок «ф», «λ» и стрелок на клавиатуре установите соответствующее угловое расстояние между источниками ф и длину волны λ (см. таблицу №1, где **номер вашего варианта** соответствует **номеру компьютера**, за которым вы работаете).

Таблица 1

№ варианта	1, 8	3, 10	2	4	6	5	7	9
$\lambda_{01}, \text{нм}$	400	360	400	360	400	360	400	360
$\lambda_{02}, \text{нм}$	560	560	500	500	500	560	560	500
$\lambda_{03}, \text{нм}$	700	700	630	700	700	630	630	630
φ, радиан	0,02π	0,04 π	0,06 π	0,02 π	0,04 π	0,06 π	0,02 π	0,04 π

4. Угол φ в процессе работы не изменять. Устанавливая поочередно $\lambda_{01}, \lambda_{02}, \lambda_{03}$, провести расчеты по пунктам 5÷8 для каждой из длин волн.
5. По графику распределения интенсивности света (**на экране монитора**) на интерференционной картине определите ширину интерференционной полосы Δх с достаточной точностью, учитывая масштаб и неполные деления (масштаб указан рядом с синусоидальным графиком).
6. По формуле (2) рассчитайте расстояние между источниками d, учитывая, что L=1м.
7. По формуле (3) определите длину волны излучаемого света λ_0 .
8. Зная заданное значение λ_0 (нм) и вычисленное λ_0 (нм), определите относительную погрешность ε измерения для каждой экспериментальной длины волны по формуле:

$$\varepsilon = \left| \frac{\lambda_0 - \lambda_3}{\lambda_0} \right| \cdot 100\%$$

9. Все данные эксперимента занесите в таблицу 2 и сделайте вывод о проделанной работе и зависимости точности данного эксперимента от длины волны.

Таблица 2

λ_0 , нм	Δx , нм	d, м	λ_3 , нм	ε , %

Задание №2

1. В программе «Волновая оптика на компьютере» выберите пункт меню «Поляризация», «Двоякопреломляющая пластина». В этой программе исследуется изменение интенсивности плоскополяризованного света при прохождении через поляризатор и анализатор.
2. В пункте меню «Пластина» установите толщину пластины равной 0,00 см с помощью стрелок на клавиатуре и клавиши Enter.
3. С помощью пунктов «P1» и «P2» установите поляризатор и анализатор.
4. Нажмите «Старт» и наблюдайте за интенсивностью прошедшего света. В левом нижнем квадрате интенсивность входящего света в поляризатор, в правом верхнем углу интенсивность выходящего света. Также вы можете менять цветовую гамму, т.е. выбрать синий, желтый или красный свет.
5. Используя кнопку «P2», установите угол наклона анализатора (**будьте внимательны!**) **0,2π**, затем **0,4π**, **0,5π**, **0,7π**, каждый раз **наблюдая** за интенсивностью прошедшего света.
6. **Сделайте вывод о зависимости интенсивности прошедшего света от угла между анализатором и поляризатором.**