

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

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ  
ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ**

Б1.Б.06 Биофизика

**Направление подготовки:** 36.03.01 «Ветеринарно-санитарная экспертиза»

**Профиль подготовки :** Ветеринарно-санитарная экспертиза

**Форма обучения :**очная

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>1. Конспект лекций .....</b>	4
1.1 <b>Лекция № 1</b> Кинематика и динамика материальной точки. Система СИ.....	4
1.2 <b>Лекция № 2</b> Вращательное движение твердого тела.....	20
1.3 <b>Лекция № 3</b> Механические колебания.....	23
1.4 <b>Лекция № 4</b> Физические основы гемодинамики. Механика сердечно-сосудистой системы.....	28
1.5 <b>Лекция № 5</b> Физические основы акустики. Биофизика инфразвука. Биофизика ультразвука.....	37
1.6 <b>Лекция № 6</b> Основы молекулярно-кинетической теории. Реальные газы.....	41
1.7 <b>Лекция № 7</b> Физические основы термодинамики.....	49
1.8 <b>Лекция № 8</b> Основы термодинамики биологических процессов.....	54
1.9 <b>Лекция № 9</b> Электростатика. Законы постоянного тока.....	60
1.10 <b>Лекция № 10</b> Электрические явления в биологических системах.....	66
1.11 <b>Лекция № 11</b> Магнитное поле тока в вакууме и в веществе. ....	72
1.12 <b>Лекция № 12</b> Электромагнитная индукция. Электромагнитные колебания и волны.....	75
1.13 <b>Лекция № 13</b> Волновая оптика.....	78
1.14 <b>Лекция № 14</b> Тепловое излучение. Квантовый механизм излучения света.	82
1.15 <b>Лекция № 15</b> Строение атома. Физика атомного ядра.....	87
<b>2. Методические указания по выполнению лабораторных работ .....</b>	95
2.1 <b>Лабораторная работа № ЛР-1</b> Вращательное движение твердого тела.....	95
2.2 <b>Лабораторная работа № ЛР-2</b> Механические колебания .....	96
2.3 <b>Лабораторная работа №ЛР-3</b> Физические основы гемодинамики. Механика сердечно-сосудистой системы.....	97
2.4 <b>Лабораторная работа № ЛР-4</b> Основы молекулярно-кинетической теории. Реальные газы.....	98
2.5 <b>Лабораторная работа №ЛР-5</b> Физические основы термодинамики.....	98
2.6 <b>Лабораторная работа № ЛР-6</b> Основы термодинамики биологических процессов.....	98
2.7 <b>Лабораторная работа №ЛР-7</b> Электростатика. Законы постоянного тока.....	99
2.8 <b>Лабораторная работа №ЛР-8</b> Магнитное поле тока в вакууме и в веществе Последовательное и параллельное соединения проводников.....	99
2.9 <b>Лабораторная работа №ЛР-9</b> Электромагнитная индукция. Электромагнитные колебания и волны .....	99

<b>2.10Лабораторная работа № ЛР-10</b>	Волновая оптика .....	101
<b>2.11Лабораторная работа № ЛР-11</b>	Тепловое излучение. Квантовый механизм излучения света.....	101
<b>3. Методические указания по проведению практических занятий .....</b>	102	
<b>3.1 Практическое занятие № ПЗ-1</b>	Строение атома. Физика атомного ядра .....	102

# 1. КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

## 1. 1 Лекция №1 ( 2 часа).

**Тема:** «Кинематика и динамика материальной точки. Система СИ»

### 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. двигателяного аппарата животных. Закон сохранения энергии в механике.

4. Система СИ.

### 1.1.2 Краткое содержание вопросов:

#### 1. Предмет, задачи и цели физики.

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

Разделы механики:

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

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

статика – является разделом динамики, изучающим равновесие тел.

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

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



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

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

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

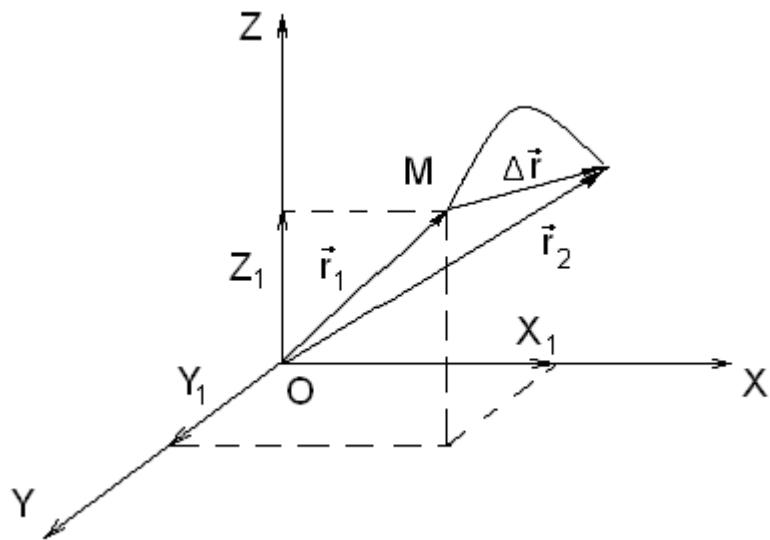


Рис. 1 – Координаты точки в декартовой системе координат  
 $O\vec{M} = \vec{r}$  – радиус-вектор точки М.

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

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

Запишем параметрические уравнения движения точки:

$$x = x(t)$$

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

$$z = z(t)$$

В векторной форме уравнения движения можно записывать в виде:

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

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

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

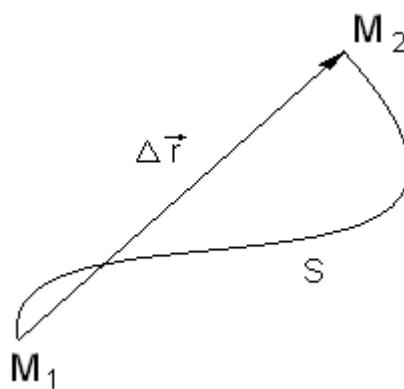


Рис. 2 – Траектория  $M_1M_2$ , путь  $S$ , вектор перемещения  $\Delta\vec{r}$

В случае прямолинейного движения перемещение и путь совпадают. В случае криволинейного движения путь и перемещение совпадают лишь при условии малости  $\Delta t$  (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:

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

где  $\Delta r$  – приращение радиус-вектора.

Направление вектора средней скорости совпадает с направлением  $\Delta r$ . Бесконечно уменьшая промежуток времени  $\Delta t$ , 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  $\Delta r$ . Модуль мгновенной скорости:

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

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

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



Рис. 3 – Направление вектора скорости

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

### 1.1.3 Ускорение материальной точки

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

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

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

*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  $a_t$  – тангенциальная составляющая ускорения.

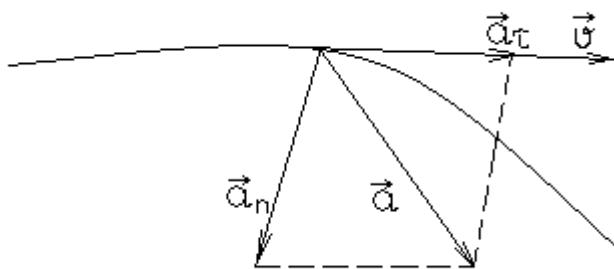


Рис. 4 – Полное ускорение и его составляющие

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

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

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

$a_{\tau}$  – 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  $\text{м/с}^2$ .

#### 1.1.4 Классификация видов движения

В зависимости от  $a_{\tau}$  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 связанные 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  $\Delta t$  совершил поворот на угол  $\Delta\phi$ .  $\Delta\phi$  – угол поворота радиус-вектора  $\vec{r}$  вокруг точки  $O$  (рис. 5).

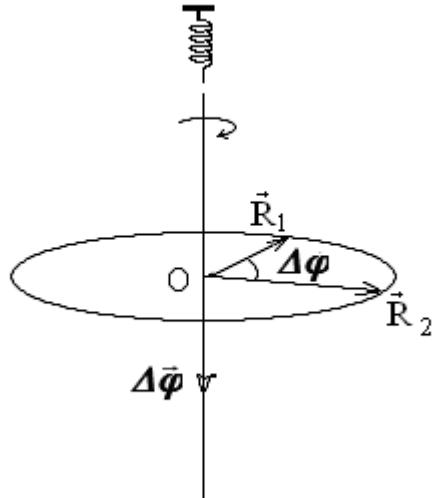


Рис. 5 – Вращение точки по окружности

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

Особенности псевдовекторов:

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

### 1.1.5 Угловая скорость

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

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

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

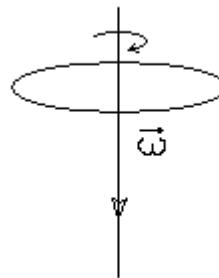


Рис. 6 – Направление угловой скорости

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

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

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

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

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

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

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

### 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/с<sup>2</sup>.

### 1.1.7 Связь между линейными и угловыми характеристиками при вращательном движении

- 1)  $s = r\phi$
- 2)  $v = r\omega$
- 3)  $a_t = r\beta$
- 4)  $a_n = \omega^2 r$

Таблица 1 – Аналогия формул для поступательного и вращательного движения.

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

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

*I з а к о н Н 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:

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

где  $F_{\text{рез}}$  – 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:

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

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

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

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

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

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

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

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

В СИ масса измеряется в килограммах (кг).

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

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

Ускорение тела зависит не только от величины воздействия, но и от свойств самого тела (массы). Ускорение, приобретаемое телом под действием силы, направлено в ту же сторону, что и сама сила. Таким образом, III 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 *центробежительной 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. Механическая работа, энергия, мощность.

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

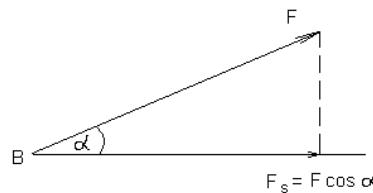


Рис. 7

$F_s$  – движущая сила, составляющая силы  $F$ .

Для характеристики перемещающего действия силы вводится понятие *работы*.

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

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

90°

180°

Работа силы при  $\alpha$  положительна, т.е. сила вызывает перемещение тела; при  $\alpha = 0$  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  $F_1, F_2 \dots F_n$ .

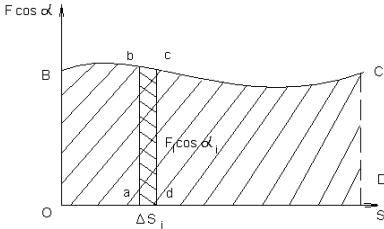


Рис. 8

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  $v$  под действием силы  $F$  (преодолевающей сопротивление движению) мощность  $N$  может быть выражена:

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

В СИ единицей измерения мощности является ватт (Вт).

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

### 6.1. Энергия

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

#### . Кинетическая энергия

*Кинетическая энергия* механической системы — это энергия механического движения этой системы:

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

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

#### 6.3. Потенциальная энергия.

##### 6.3.1. Потенциальная энергия сжатой пружины.

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

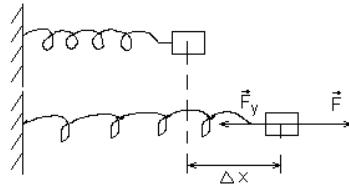


Рис. 9

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

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

$$A = E_{p1} - E_{p2} = -\Delta E_p \quad (6.1)$$

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  $M$ .

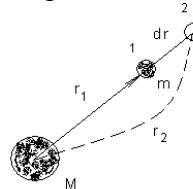


Рис. 10

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:  $A = \int_1^2 F dr = \int_1^2 \gamma \frac{mM}{r^2} dr = \gamma m M \int_1^2 \frac{dr}{r^2} \Rightarrow A = \gamma \frac{mM}{r_2} - \gamma \frac{mM}{r_1} = -\Delta E_p \quad (6.2)$

Таким образом, потенциальная энергия тела  $m$  в поле тела  $M$  определяется формулой вида  $E_p = \gamma \frac{mM}{r}$ .

Проанализируем полученную формулу:

- 1) Работа не зависит от формы пути, зависит от начальной и конечной точки перемещения;
  - a) 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

#### 4. Основные единицы СИ

##### **Длина**

**Метр, м:** метр есть длина пути, пройденного светом в вакууме за интервал времени  $1/299 792 458$  доли секунды.

*Из этого следует, что скорость света в вакууме равна  $c = 299 792 458 \text{ м/с}$  точно.*

##### **Масса**

**Килограмм, кг:** килограмм есть единица массы, равная массе международного прототипа килограмма.

*Из этого следует, что масса международного прототипа килограмма всегда равна 1 кг точно.*

##### **Время**

**Секунда, с:** секунда есть длительность 9 192 631 770 периодов излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия – 133.

*Из этого следует, что сверхтонкое расщепление атома цезия – 133 в основном состоянии, равно 9 192 631 770 Гц точно.*

##### **Сила электрического тока**

**Ампер, А:** Ампер есть сила постоянного тока, который при прохождении по двум строго параллельным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 метра один от другого, вызвал бы между этими проводниками на участке проводника длиной 1 метр силу взаимодействия, равную  $2 \cdot 10^{-7} \text{ Н}$ .

*Из этого следует, что магнитная постоянная  $\mu_0$  (известная так же как магнитная проницаемость в вакууме) равна точно  $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Н/м}$ .*

##### **Термодинамическая температура**

**Кельвин, К:** Кельвин есть единица термодинамической температуры, равная  $1/273, 16$  части термодинамической температуры тройной точки воды.

*Из этого следует, что термодинамическая температура тройной точки воды,  $T_{\text{тр}} T_{\text{трв}}$ , равна точно 273, 16 К.*

##### **Количество вещества**

##### **Моль, моль:**

1. Моль есть количество вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в углероде – 12 массой 0,012 килограмма.
2. При применении моля должны быть определены структурные элементы, которыми могут быть отдельные атомы, молекулы, ионы, электроны, другие частицы или определенные группы таких частиц.

*Из этого следует что, молярная масса углерода – 12,  $M(^{12}\text{C})^M(^{12}\text{C})$ , равна точно*

*12 г/моль.*

## Сила света

**Кандела,кд:** кандела есть сила света в данном направлении от источника, испускающего монохроматическое излучение с частотой  $540 \cdot 10^{12}$  Гц, интенсивность излучения которого в этом направлении составляет  $1/683$  Ватт на стерадиан.

Из этого следует, что спектральная сила света для монохроматического излучения с частотой  $540 \cdot 10^{12}$  Гц равна  $683$  лм/Вт точно.

Семь основных величин, которые соответствуют семи основным единицам, – это длина, масса, время, сила электрического тока, термодинамическая температура, количество вещества и сила света. В таблице 2 даны основные величины и основные единицы с обозначениями.

**Таблица 1 – Основные величины и основные единицы СИ**

Наименование основной величины	Обозначение	Наименование основной величины	Обозначение
1	2	3	4
Линейные размеры	$l, h, r, x$	метр	$m$
Масса	$m$	килограмм	$kg$
Время, длительность	$t$	секунда	$s$
Сила электрического тока	$I$	ампер	$A$
Термодинамическая температура	$T$	кельвин	$K$
Количество вещества	$\nu$	моль	$mol$
Сила света	$I_v$	кандела	$cd$

Все остальные величины называются производными величинами и измеряются в производных единицах, которые образуются через основные единицы по математическим правилам и определяются как произведение основных единиц в соответствующей степени.

### 1. Производные единицы СИ

Производные единицы могут быть выражены через основные с помощью математических операций: умножения и деления. Некоторым из производных единиц, для удобства, присвоены собственные названия, такие единицы тоже можно использовать в математических выражениях для образования других производных единиц.

Математическое выражение для производной единицы измерения вытекает из физического закона, с помощью которого эта единица измерения определяется или определяется физической величиной, для которой она вводится. Например, скорость – это расстояние, которое тело проходит в единицу времени; соответственно, единица измерения скорости – м/с (метр в секунду).

Часто одна и та же единица может быть записана по-разному, с помощью разного набора основных и производных единиц. Однако на практике используются установленные (или просто общепринятые) выражения, которые наилучшим образом отражают физический смысл величины. Например, для записи значения момента силы следует использовать Н · м, и не следует использовать м · Н или Дж.

*Например.* Для того чтобы определить в каких единицах измеряется мощность, следует вспомнить несколько формул:

$$N = A/t,$$

где  $A$  – работа,  $\text{Дж}$ ,  $t$  – время, с.

Таким образом:  $N = \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{с}} \right] = [\text{Вт}]$ .

$$A = F \cdot S,$$

где  $F$  – сила,  $H$ ,  $S$  – путь,  $\text{м}$ .

Таким образом:  $A = [\text{Н} \cdot \text{м}] = [\text{Дж}]$

$$F = ma,$$

где  $a$  – ускорение,  $\text{м}/\text{с}^2$ ,  $m$  – масса,  $\text{кг}$

Таким образом:  $F = \left[ \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2} \right]$ .

$$a = \frac{v - v_0}{t},$$

Таким образом:  $a = \left[ \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \right]$

$$v = \frac{s}{t},$$

Таким образом:  $v = \left[ \frac{\text{м}}{\text{с}} \right]$

В таблице 2 приведены примеры производных величин.

**Таблица 2 – Примеры производных величин и единиц**

Наименование основной величины	Обозначение	Наименование основной величины	Обозначение
1	2	3	4
Площадь	$S$	Квадратный метр	$\text{м}^2$
Объем	$V$	Кубический метр	$\text{м}^3$
Скорость	$v$	Метр в секунду	$\text{м}/\text{с}$
Ускорение	$a$	Метр в секунду в квадрате	$\text{м}/\text{с}^2$
Волновое число	$k$	Метр в минус первой степени	$\text{м}^{-1}$
Плотность объемная	$\rho$	Килограмм на метр кубический	$\text{кг}/\text{м}^3$
Поверхностная плотность	$\rho_s$	Килограмм на метр квадратный	$\text{кг}/\text{м}^2$
Удельный объем	$V_{\text{уд}}$	Кубический метр на килограмм	$\text{м}^3/\text{кг}$
Плотность силы электрического тока	$j$	Ампер на метр квадратный	$\text{А}/\text{м}^2$
Напряженность магнитного поля	$H$	Ампер на метр	$\text{А}/\text{м}$
Молярная концентрация	$c$	Моль на метр кубический	$\text{моль}/\text{м}^3$
Яркость	$L_v$	Кандела на метр	$\text{кд}/\text{м}^2$

		квадратный	
Показатель преломления	$n$	Единица	$1$
1	2	3	4
Относительная проницаемость	$\mu_r$	Единица	1

Некоторым производным единицам присвоены специальные названия, что является ничем иным как упрощенной (компактной) формой выражения комбинаций часто используемых основных единиц (например, Джоуль, обозначаемый Дж). Двадцать две производные единицы со специальными наименованиями, разрешенные в настоящее время к применению, приведены в таблице 3.

**Таблица 3 – Производные единицы СИ, имеющие специальные наименования**

Наименование производной величины	Наименование производной единицы	Обозначение производной единицы	Выражение через другие единицы
1	2	3	4
Плоский угол	Радиан	$Рад$	$м/м = 1$
Телесный угол	Стерадиан	$Ср$	$м^2/м^2 = 1$
Частота	Герц	$Гц$	$с^{-1}$
Сила	Ньютон	$Н$	$кг\cdot м\cdot с^{-2}$
Давление	Паскаль	$Па$	$Н/м^2 = м^{-1}кгс^{-2}$
Энергия, работа	Джоуль	$Дж$	$Н\cdot м = м^2кгс^{-2}$
Мощность, поток излучения	Ватт	$Вт$	$Дж/с = м^2кгс^{-3}$ $3\cdot м^2кгс^{-3}$
Электрический заряд, количество электричества	Кулон	$Кл$	$А\cdot с$
Разность электр. потенциалов	Вольт	$В$	$Вт/А = м^2кгс^{-3}А^{-1}$ $1\cdot м^2кгс^{-3}А^{-1}$
1	2	3	4
Электрическая емкость	фарад	$Ф$	$Кл/В = м^2кг^{-1}$ $1\cdot с^4\cdot А^2\cdot м^2\cdot кг^{-1}\cdot с^4\cdot А^2$
Электрическое сопротивление	Ом	$Ом$	$В\cdot А = м^2кг^{-1}с^{-3}А^{-1}$ $2\cdot м^2кгс^{-3}А^{-2}$

Электрическая проводимость	сименс	$Cm$	$A/B = m^{-2} kg^{-1} c^3 A^2$
Магнитный поток	вебер	$B\delta$	$B \cdot c = m^2 kg c^{-2} A^{-1}$
Плотность магнитного потока	тесла	$Tl$	$B\delta / m^2 = kg c^{-1} A^{-1}$
Индуктивность	генри	$H$	$B\delta / A = m^2 kg c^{-2} A^{-2}$
Световой поток	люмен	$lm$	$Kd \cdot sr = k \delta$
Освещенность	люкс	$lk$	$lm / m^2 = m^{-2} k \delta m^2 = m^{-2} k \delta$
Активность (радиоактивного источника)	беккерель	$Bk$	$c^{-1}$
Поглощенная доза ионизирующего излучения	грей	$gr$	$Dж/c = m^2 c^{-2} m^2 c^{-2}$
Эквивалентная доза, амбиентная эквивалентная доза	зиверт	$Зв$	$Dж / k \delta = m^2 c^{-2} m^2 c^{-2}$

Для каждой величины существует только одна определенная единица СИ (например, единица СИ  $Dж/K$  может использоваться для выражения значений, как теплоемкости, так и энтропии). Именно поэтому важно не использовать только наименование единицы для идентификации величины. Это относится как к научным текстам, так и к средствам измерений (т.е. показание прибора должно показывать и величину, о которой идет речь, и единицу измерения).

Несмотря на то, что обе единицы Герц и Беккерель обратно пропорциональны секунде, Герц используется только для периодических явлений, а Беккерель – для стохастических процессов радиоактивного распада.

Единица температуры Цельсия есть градус Цельсия,  $^{\circ}C$ , равный по величине Кельвину,  $K$ , единице термодинамической температуры. Величина температуры Цельсия  $t^{\circ}C$  связана с термодинамической температурой  $TK$  и определяется уравнением:  $t^{\circ}C = TK - 273,15$ .

Зиверт используется также для определения величин прямой эквивалентной дозы.

В таблице 3 последние четыре единицы со специальными названиями были установлены с целью гарантии достоверных измерений, связанных со здоровьем человека.

Безразмерные величины, также называемые величинами размерности «единица», обычно определяется как отношение двух величин одинакового рода (например, показатель преломления – это отношение двух скоростей, а относительная проницаемость – это отношение проницаемости диэлектрической среды к проницаемости диэлектрической среды к проницаемости свободного пространства). Таким образом, единица безразмерной величины есть отношение двух одинаковых единиц СИ и всегда

равна единице. Однако в выражении значений безразмерных значений безразмерных величин число единица, «1», не пишется.

### 3. Перевод в СИ

#### 3.1 Стандартный вид положительного числа

Для удобства вычислений положительную конечную десятичную дробь иногда представляют в стандартном виде. *Что это такое?*

Рассмотрим несколько примеров.

1. Число  $a_1 = 274,35$  можно записать так:  $2,7435 \cdot 10^2$ .
2. Число  $a_2 = 5434$  можно записать так:  $5,434 \cdot 10^3$ .
3. Число  $a_3 = 0,273$  можно записать так:  $2,73 \cdot 10^{-1}$ .
4. Число  $a_4 = 0,0013$  можно записать так:  $1,3 \cdot 10^{-3}$ .
5. Число  $a_5 = 3,62$  можно записать так:  $3,62 \cdot 10^0$ .

Во всех случаях мы представили заданное положительное число  $a$  в виде произведения двух множителей. В качестве первого множителя мы брали число с одной значащей цифрой до запятой, т. е. число, целая часть которого – однозначное число (от 1 до 9). В качестве второго множителя брали число 10 в целой степени.

*Определение.* Стандартным видом *положительного числа* называют его представление в виде  $a \cdot 10^m$ , где  $1 < a < 10$ , а  $m$  – целое число.

Переход к стандартному виду числа иногда используют для вычислений.

*Пример.* Вычислить:

$$\text{а) } 2734 \cdot 0,007; \quad \text{б) } 24,377 : 0,22; \quad \text{в) } (0,0043)^2.$$

*Решение.*

$$\begin{aligned} \text{а) } 2734 \cdot 0,007 &= (2,734 \cdot 10^3) \cdot (7 \cdot 10^{-3}) = (2,734 \cdot 7) \cdot (10^3 \cdot 10^{-3}) = 19,138 \cdot 10^{3+(-3)} = \\ &= 19,138 \cdot 10^0 = 19,138; \\ \text{б) } 24,377 : 0,22 &= (2,4377 \cdot 10) : (2,2 \cdot 10^{-1}) = (2,4377 : 2,2) \cdot (10 : 10^1) = 1,10805 \cdot 10^{(1-1)} = \\ &= 1,10805 \cdot 10^0 = 1,10805; \\ \text{в) } (0,0043)^2 &= (4,3 \cdot 10^{-3})^2 = 4,3^2 \cdot (10^{-3})^2 = 18,49 \cdot 10^{-6} = 1,849 \cdot 10 \cdot 10^{-6} = 1,849 \cdot 10^{-5}. \end{aligned}$$

Однако основная польза от стандартной записи числа заключается в следующем. Представьте себе, что вы производите вычисления или с очень большими, или с очень маленькими положительными числами. Вам нужно вывести, скажем, на дисплей калькулятора числа  $a = 217000000000$  и  $b = 0,0000045412$  и перемножить их. А на экране умещается только 8 знаков. Вот тут-то и пригодятся стандартные записи чисел.

Имеем:  $a = 2,17 \cdot 10^{11}$ ;  $b = 4,5412 \cdot 10^{-6}$ ;

$$\text{Тогда, } a \cdot b = 2,17 \cdot 10^{11} \cdot 4,5412 \cdot 10^{-6} = 9,854404 \cdot 10^5 = 985440,4.$$

#### 3.2 Кратные десятичные и дольные единицы СИ

Было решено ввести приставки для обозначения величин, которые значительно больше или меньше тех же единиц СИ, но без приставок. Примеры приставок единиц СИ приведены в таблице 4. Допускается применение приставок с любыми основными и производными единицами со специальными наименованиями.

**Таблица 4 – Наименования и обозначения приставок для единиц СИ**

Множитель	Наименование	Обозна- чение	Множитель	Наименование	Обозна- чение
1	2	3	4	5	5
$10^1 10^1$	дека	да	$10^{-1} 10^{-1}$	деци	д

$10^2 10^2$	гекто	г	$10^{-2} 10^{-2}$	санти	с
$10^3 10^3$	кило	к	$10^{-3} 10^{-3}$	милли	м
$10^6 10^6$	мега	М	$10^{-6} 10^{-6}$	микро	мк
$10^9 10^9$	гига	Г	$10^{-9} 10^{-9}$	нано	н
$10^{12} 10^{12}$	тера	Т	$10^{-12} 10^{-12}$	пико	п
$10^{15} 10^{15}$	пета	П	$10^{-15} 10^{-15}$	фемто	ф
1	2	3	4	5	6
$10^{18} 10^{18}$	экса	Э	$10^{-18} 10^{-18}$	атто	а
$10^{21} 10^{21}$	зетта	З	$10^{-21} 10^{-21}$	зепто	з
$10^{24} 10^{24}$	йотта	Й	$10^{-24} 10^{-24}$	йокто	й

Слово с приставкой образуется при слиянии в одно слово – наименования приставки и наименования единицы. Таким же образом слитно, без пробела, пишется приставка с обозначением единицы измерения. Составное обозначение, в свою очередь, может быть возведено в любую степень. Например, можно записать километр как  $км$ ,  $м$  микровольт как  $мкВ$ , фемтосекунда как  $фс$ .

$$10^{-2} \cdot 10^{-1} = 5000 В$$

Использование приставок удобно, поскольку нет необходимости указывать множитель,  $10^m$ , для выражения очень больших или очень маленьких числовых значений. Например, длину химической связи удобнее выражать через нанометры,  $нм$ , чем в метрах,  $м$ , а расстояние от Лондона до Парижа удобнее давать в километрах,  $км$ , чем в метрах,  $м$ .

Килограмм,  $кг$ , является исключением, хотя он и является основной единицей, но в своем наименовании в силу исторических причин уже содержит приставку. Для кратных и дольных значений килограмма присоединяют не к килограмму, а к грамму, и, таким образом, следует писать, например, миллиграмм,  $мг$ , а не микрокилограмм,  $мкг$ .

## Лекция №2 (2 часа)

Тема: «Вращательное движение твердого тела.»

### 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.

### 1.2.2 Краткое содержание вопросов

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:

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

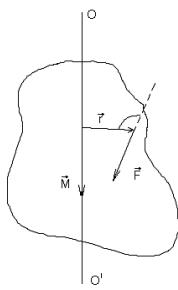


Рис. 11

$\vec{M}$  – 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.

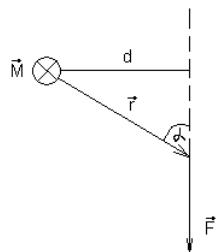


Рис. 12

Таким образом:

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

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

### 8.3. Основное уравнение динамики вращательного движения

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

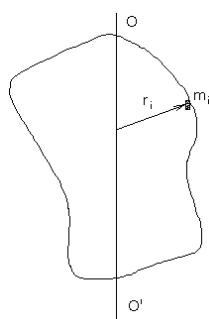


Рис. 13

Запишем второй закон Ньютона для массы  $m_i: F_i = m_i a_i$ . Заменим  $a_i = [\beta r]$  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  $\sum_{i=1}^n M_i = \sum_{i=1}^n I_i \cdot \beta$

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

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

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

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

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

#### 8.4. Момент инерции твёрдого тела. Способы его вычисления.

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

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

В случае непрерывного распределения масс (тело правильной геометрической формы) эта сумма сводится 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.*

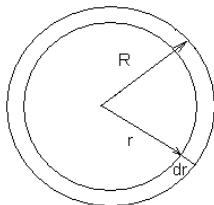


Рис. 15

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

$$I_d = \frac{1}{2} M R^2 \quad (8.7)$$

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

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

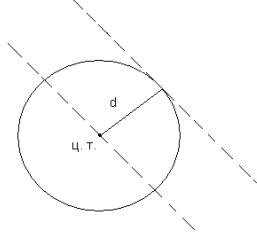


Рис. 16

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

Если тело неправильной геометрической формы, то момент инерции можно найти косвенным 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  $\sum_{i=1}^n M_i = 0 \Rightarrow \sum_{i=1}^n I_i \omega_i = \text{const}$  (9.1)

Уравнение (9.1) есть *закон сохранения момента импульса*.

Причем  $I\vec{\omega}$  – величина векторная и неизменными остается 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  $\omega$  (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 движении, то его кинетическая энергия равна сумме кинетических энергий поступательного движения и вращения (например, цилиндр, скатывающийся с наклонной плоскости без скольжения):

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

Данное положение учитывают при решении многих практических задач.

### 9.4. Аналогия формул поступательного и вращательного движения

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

## Лекция №3 (2 часа)

Тема: «Механические колебания.»

### 1.3.1 Вопросы лекции:

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

2. 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.

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

### 1.3.2 Краткое содержание вопросов

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

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

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

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

#### 10.1. Гармоническое колебательное движение и его характеристики.

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

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

где  $x$  – смещение колеблющейся точки;

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

$\omega$  – круговая (циклическая) частота;

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

$T$  – период колебаний (время одного полного колебания);

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

$\nu$  – 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  $\nu$  измеряется в герцах (Гц).

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

$\phi_0$  – начальная фаза;

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

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

Ускорение колеблющейся частицы первая производная скорости по времени:

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

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

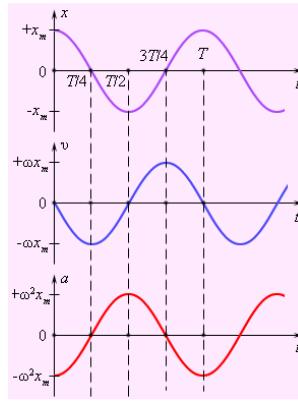


Рис. 17  
10.2. Динамика колеблющейся точки

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

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

### Маятник

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

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

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

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

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

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

$$mg\sin\alpha = F_B$$

$$mg\sin\alpha = -kx = F_B$$

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

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

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

Формула (10.8) – *период колебаний математического маятника*.

Из формулы (10.8) следует, что:

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

Следует отметить, что плоскость колебания маятника в пространстве сохраняется.

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

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

Где  $l$  — 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  $\frac{1}{2}mv^2$  и потенциальной  $\frac{1}{2}kx^2$ , т.е.  $\frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}kx^2$ . Заменим  $v = \omega x$  и  $k = \frac{m\omega^2}{l}$ , а также учитывая, что получим:

$$\frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}kx^2 = \frac{1}{2}m\omega^2 x^2 + \frac{1}{2}\frac{m\omega^2}{l}x^2 = \frac{1}{2}m\omega^2 x^2 \left(1 + \frac{l}{m}\right) \quad (10.10)$$

$$\frac{1}{2}m\omega^2 x^2 \left(1 + \frac{l}{m}\right) = \frac{1}{2}m\omega^2 x^2 \left(1 + \frac{1}{\omega^2 l}\right) \quad (10.11)$$

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

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

### 11.1. Свободные колебания

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

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

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{k}{m}x = 0 \quad (11.1)$$

(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.

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{k}{m}x + \frac{c}{m}\frac{dx}{dt} = 0 \quad (11.2)$$

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

$$x = A_0 e^{-\frac{c}{2m}t} \cos(\omega_n t + \phi) \quad (11.3)$$

где  $x$  — смещение;  $A_0$  — начальная амплитуда;  $e$  — основание натурального логарифма;  $\delta$  — коэффициент затухания,  $t$  — время.

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

$$\delta = \frac{A_1}{A_2} \quad (11.4)$$

$$\delta = \ln \frac{A_1}{A_2} \quad (11.5)$$

(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:  $\delta = \frac{c}{2m}$

(11.6)

Коэффициент затухания зависит от массы и сопротивления среды:

—(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:

— (11.8)

Проводя соответствующие преобразования, получаем решение данного уравнения:

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

$$A_{\text{пер.}} = \frac{f_0}{m(\omega_0^2 + \omega_B^2)} \quad (11.10)$$

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:

$$\frac{m \ddot{x}}{\omega^2} = -KX + f_0 \sin \omega_B t - F_{\text{тр.}} \quad (11.11)$$

И тогда:

$$A_{\text{пер.}} = \frac{f_0}{\sqrt{m^2(\omega_0^2 - \omega_B^2) + 4 \delta \omega^2}} \quad (11.12)$$

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:

— (11.13)

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

### 12.1. Волны в упругой среде.

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

Скорость волны:

—(12.1)

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

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

*Фазовая скорость* — это скорость, с которой двигается фаза суммарного колебания.

*Групповая скорость* — это скорость перемещения пакета сложного колебания.

### 12.2. Уравнение бегущей волны.

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

$$— \quad — \quad (12.2)$$

$$— \quad — \quad (12.3)$$

$$(12.4)$$

где — называется *волновым числом*.

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

*Интенсивность волны* — это количество энергии переносимой волной через единичную площадку расположенную нормально к лучу за единицу времени  $I \sim KA^2$ .

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

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

Уравнение стоячей волны:

$$— \quad — \quad (12.5)$$

### 12.3. Звуковые волны

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

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

Психофизические характеристики звука:

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

Лекция 3 (Л-3) Физические основы гемодинамики. Механика сердечно-сосудистой системы. 1 ч

## Лекция №4 (2 часа)

Тема: «Физические основы гемодинамики. Механика сердечно-сосудистой системы»

### 1.4.1 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 неильтоновская 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.

### 1.4.2 Краткое содержание вопросов

## Элементы механики жидкостей

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

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

Говоря о реальной жидкости можно сказать, что:

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

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

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

Воображаемую жидкость не обладающую ни сжимаемостью, ни вязкостью называют *и д е а л ь н о й ж и д к о с т ь ю*.

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

Для идеальной жидкости важно выполнение двух условий:

1)  $\rho = \text{const}$

2)  $\eta = 0$

### 13.2. Основные понятия механики жидкостей

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

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

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

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

Поскольку линии тока не пересекаются, жидкость не может проходить через боковую поверхность этого объёма (ни внутрь объёма, ни из него), т.е. рассматриваемый

объём подобен трубке с непроницаемыми для жидкости стенками. Поэтому, объём жидкости, ограниченный линиями тока, называется *трубкой тока*.

### 13.3. Уравнение неразрывности струи

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

Для данной трубки тока произведение площади поперечного сечения трубы на скорость течения жидкости есть величина постоянная. Соотношение (13.1) называется *уравнением неразрывности струи*. Оно справедливо не только для трубы тока, но и для любой реальной трубы, для русла реки и т.п. Таким образом форма трубы определяет скорость течения жидкости (газа): скорость возрастает там, где трубы 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  $\text{м}^3/\text{с}$ .

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

$\rho gh$  – 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  $\text{м}^2$ .

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

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

Величину  $P$  называют статическим давлением;

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

Величину  $\rho gh$  – 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 трубы 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.

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

$$\frac{\rho v_2^2}{2} \Rightarrow$$

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

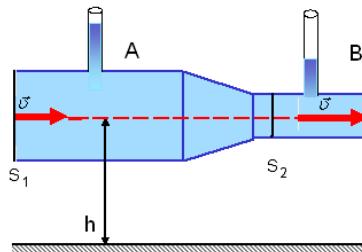
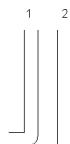


Рис. 25

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

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



Для измерения полного давления применяют манометрическую трубку 1, изогнутую под прямым углом навстречу движению 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:  $P_{\text{дин}} = \frac{\rho v^2}{2} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2P_{\text{дин}}}{\rho}}$ .

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.

Объём крови, протекающей через поперечное сечение сосуда в единицу времени, называют **объёмной скоростью кровотока (мл/мин)**. Объёмная скорость кровотока через большой и малый круг кровообращения одинакова. Объём кровотока через аорту или лёгочный ствол равен объёму кровотока через суммарное поперечное сечение сосудов на любом отрезке кругов кровообращения.

## Движущая сила кровотока

Это разность кровяного давления между проксимальным и дистальным участками сосудистого русла. Давление крови создаётся давлением сердца и зависит от упруго-эластических свойств сосудов.

Поскольку давление в артериальной части кругов кровообращения является пульсирующим в соответствии с фазами работы сердца, для его гемодинамической характеристики принято использовать величину **среднего давления** ( $P_{cp}$ ). Это усреднённое давление, которое обеспечивает такой же эффект движения крови, как и пульсирующее давление. Среднее давление в аорте равно примерно 100 мм рт. ст. Давление в полых венах колеблется около нуля. Таким образом, движущая сила в большом круге кровообращения равна разнице между этими величинами, то есть 100 мм рт. ст. Среднее давление крови в лёгочном стволе менее 20 мм рт. ст., в лёгочных венах близко к нулю — следовательно, движущая сила в малом круге — 20 мм рт. ст., то есть в 5 раз меньше, чем в большом. Равенство объёмов кровотока в большом и малом круге кровообращения при существенно различающейся движущей силе связано с различиями в сопротивлении току крови — в малом круге оно значительно меньше.

## Сопротивление в кровеносной системе

Если общее сопротивление току крови в сосудистой системе большого круга принять за 100 %, то в разных её отделах сопротивление распределяется следующим образом. В аорте, крупных артериях и их ветвях сопротивление току крови составляет около 19 %; на долю мелких артерий (диаметром менее 100 мкм) и артериол приходится 50 % сопротивления; в капиллярах сопротивление составляет примерно 25 %, в венулах — 4 %, в венах — 3 %. **Общее периферическое сопротивление (ОПС)** — это суммарное сопротивление параллельных сосудистых сетей большого круга кровообращения. Оно зависит от градиента давления ( $P$ ) в начальном и конечном отделах большого круга кровообращения и объёмной скорости кровотока ( $Q$ ). Если градиент давления равен 100 мм рт. ст., а объёмная скорость кровотока — 95 мл/с, то величина ОПС составит:

$$OPC = 100 \text{ мм рт. ст.} \times 133 \text{ Па} / 95 \text{ мл/с} = 140 \text{ Па} \cdot \text{с/см}^3$$

(1 мм рт. ст. = 133 Па)

В сосудах малого круга кровообращения общее сопротивление равно примерно 11 Па·с/мл.

Сопротивление в региональных сосудистых сетях различно, оно наименьшее в сосудах чревной области, наибольшее в коронарном сосудистом русле.

Согласно законам гидродинамики, сопротивление току крови зависит от длины и радиуса сосуда, по которому течёт жидкость, и от вязкости самой жидкости. Эти взаимоотношения описывает формула Пуазейля:

## Закон Пуазейля

Закон Пуазейля представляет собой формулу для объемной скорости течения жидкости. Он был открыт экспериментально французским физиологом Пуазейлем, который исследовал течение крови в кровеносных сосудах. Закон Пуазейля часто называют

главным законом гидродинамики.

Закон Пуазейля связывает объемную скорость течения жидкости с разностью давления в начале и конце трубы как движущей силой потока, вязкостью жидкости, радиусом и длиной трубы. Закон Пуазейля используют в случае, если течение жидкости ламинарное. Формула закона Пуазейля:

$$Q = \frac{(P_1 - P_2) \cdot \pi \cdot r^4}{8 \cdot \eta \cdot l} \quad (6)$$

где  $Q$  - объемная скорость жидкости ( $\text{м}^3/\text{с}$ ),  $(P_1 - P_2)$  - разница давления через концы трубы ( $\text{Па}$ ),  $r$  - внутренний радиус трубы ( $\text{м}$ ),  $l$  - длина трубы ( $\text{м}$ ),  $\eta$  - вязкость жидкости ( $\text{Па с}$ ).

Закон Пуазейля показывает, что величина  $Q$  пропорциональна разнице давления  $P_1 - P_2$  в начале и конце трубы. Если  $P_1$  равняется  $P_2$ , поток жидкости прекращается. Формула закона Пуазейля также показывает, что высокая вязкость жидкости приводит к снижению объемной скорости течения жидкости. Оно также показывает, что объемная скорость жидкости чрезвычайно зависит от радиуса трубы. Это подразумевает, что умеренные изменения радиуса кровеносных сосудов могут обеспечивать большие различия объемной скорости жидкости, протекающей через сосуд.

Формула закона Пуазейля упрощается и становится более универсальной при введении вспомогательной величины - *гидродинамического сопротивления*  $R$ , которое для цилиндрической трубы может быть определено по формуле:

$$R = \frac{8 \cdot \eta \cdot l}{\pi \cdot r^4} \quad (7).$$

Закон Пуазейля, таким образом, показывает, что объемная скорость жидкости прямо пропорциональна разнице давления в начале и конце трубы и обратно пропорциональна гидродинамическому сопротивлению:

$$Q = \frac{P_1 - P_2}{R} \quad (8)$$

Применительно к системе кровообращения длина сосудов довольно постоянна, а радиус сосуда и вязкость крови — переменные параметры. Наиболее изменчивым является радиус сосуда, и именно он вносит существенный вклад в изменения сопротивления току крови при различных состояниях организма, так как величина сопротивления зависит от радиуса, возведённого в четвёртую степень. Вязкость крови связана с содержанием в ней белков и форменных элементов. Эти показатели могут меняться при различных состояниях организма — анемии, полицитемии, гиперглобулинемии, а также различаются в отдельных региональных сетях, в сосудах разного типа и даже в ветвях одного сосуда. Так, в зависимости от диаметра и угла отхождения ветви от основной артерии в ней может меняться соотношение объемов форменных элементов и плазмы. Это связано с тем, что в пристеночном слое крови больше доля плазмы, а в осевом — эритроцитов, поэтому при дихотомическом делении сосуда меньшая по диаметру ветвь или ветвь, отходящая под прямым углом,

получает кровь с большим содержанием плазмы. Вязкость движущейся крови меняется в зависимости от характера кровотока и диаметра сосудов.

Длина сосуда как фактор, влияющий на сопротивление, имеет значение для понимания того, что **наибольшее сопротивление** току крови оказывают артериолы, имеющие относительно большую длину при малом радиусе, а не капилляры: их радиус сопоставим с радиусом артериол, но капилляры короче. Из-за большого сопротивления току крови в артериолах, которое к тому же может значительно меняться при их сужении или расширении, артериолы называют «кранами» сосудистой системы. Длина сосудов меняется с возрастом (пока человек растёт), в скелетных мышцах длина артерий и артериол может меняться при сокращении и растяжении мышц.

*Сопротивление току крови и вязкость зависят также от характера кровотока* — турбулентного или ламинарного. В условиях физиологического покоя почти во всех отделах кровеносной системы наблюдается ламинарное, то есть слоистое течение крови, без завихрений и перемешивания слоёв. Вблизи стенки сосуда располагается слой плазмы, скорость движения которого ограничивается неподвижной поверхностью стенки сосуда, по оси с большой скоростью движется слой эритроцитов. Слои скользят относительно друг друга, что создаёт сопротивление (трение) для течения крови как гетерогенной жидкости. Между слоями возникает напряжение сдвига, тормозящее движение более быстрого слоя. Согласно уравнению Ньютона, *вязкость движущейся жидкости () прямо пропорциональна величине напряжения сдвига () и обратно пропорциональна разнице скоростей движения слоёв ()*:  $v = \tau / \eta$ . Поэтому при снижении скорости движения крови вязкость увеличивается, в физиологических условиях это проявляется в сосудах с малым диаметром. Исключением являются капилляры, в которых эффективная вязкость крови достигает значений вязкости плазмы, то есть снижается в 2 раза благодаря особенностям движения эритроцитов. Они скользят, двигаясь друг за другом (по одному в цепочке) в «смазочном» слое плазмы и деформируясь в соответствии с диаметром капилляра.

Для турбулентного течения характерно наличие завихрений, при этом кровь перемещается не только параллельно оси сосуда, но и перпендикулярно ей. Турбулентное течение наблюдается в проксимальных отделах аорты и лёгочного ствола в период изгнания крови из сердца, локальные завихрения могут создаваться в местах разветвлений и сужений артерий, в области крутых изгибов артерий. Движение крови может стать турбулентным во всех крупных артериях при возрастании объёмной скорости кровотока (например, при интенсивной мышечной работе) или снижении вязкости крови (при выраженной анемии). Турбулентное движение существенно увеличивает внутреннее трение крови, и для её продвижения требуется значительно большее давление, при этом нагрузка на сердце увеличивается.

Таким образом, **разница давлений и сопротивление кровотоку** являются факторами, влияющими на объём кровотока ( $Q$ ) в целом в сосудистой системе и в отдельных региональных сетях: он прямо пропорционален разности давлений крови в

начальном ( $P_1$ ) и конечном ( $P_2$ ) отделах сосудистой сети и обратно пропорционален сопротивлению ( $R$ ) току крови:

Увеличение давления или уменьшение сопротивления току крови на системном, региональном, микроциркуляторном уровнях повышают объём кровотока соответственно в системе кровообращения, в органе или микрорегионе, а уменьшение давления или увеличение сопротивления уменьшают объём кровотока.

### **Вязкость крови**

Кровь является взвесью клеток крови в жидкости сложного состава, называемой плазмой. Различают красные клетки крови (эритроциты), белые клетки крови (лейкоциты) и тромбоциты. Плазма - водный раствор электролитов, белков, питательных веществ, продуктов метаболизма и т.п. Объем крови в организме составляет почти 7% объема человеческого тела. Эритроциты занимают около 45 % объема крови, а другие клетки крови - менее чем 1%. Относительный объем клеток крови и плазмы определяют с помощью прибора *гематокрита*. Это же название используют для определения результатов анализа.

Кровь является более плотной и вязкой, чем вода. В среднем относительная вязкость крови составляет почти 4,5 (3,5-5,4). Относительная вязкость плазмы - 2,2 (1,9 - 2,6). Вязкость крови измеряется в лаборатории с помощью специального прибора - *медицинского вискозиметра*. Кровь является неньютоновской жидкостью. Но при такой скорости течения, которая поддерживается в сосудах кровеносной системы, вязкие свойства крови можно рассматривать, как для ньютоновских жидкостей.

Вязкость крови зависит, главным образом, от концентрации эритроцитов и меньше - от концентрации белков плазмы. Она зависит также от скорости течения крови. Если скорость течения крови уменьшается, эритроциты собираются в специфические скопления, так называемые "монетные столбики". Это приводит к повышению вязкости крови. Такой феномен может наблюдаться в мелких кровеносных сосудах, где скорость течения крови небольшая.

Однако существует физиологический механизм, который способствует уменьшению вязкости крови в небольших сосудах, называемый эффектом Фареуса-Линдквиста. Этот эффект объясняется ориентацией эритроцитов вдоль оси сосуда. Эритроциты, формируя цилиндрический осевой ток, скользят по слою окружающей их плазмы крови.

Структура и некоторые биофизические свойства сердечно-сосудистой системы

Сердечно-сосудистая система состоит из сердца и разветвленной замкнутой системы кровеносных сосудов, которые перемещают кровь во все части тела и в сердце.

Сосудистая система состоит из *системной циркуляции* и *легочной циркуляции*.

Кровеносные сосуды включают артерии, капилляры и вены. По артериям кровь поступает в органы и ткани. Через вены перемещается обратный поток крови. Каждая большая артерия, начинающаяся с аорты, ветвится, формируя меньшие артерии, которые, в свою очередь, разветвляются дальше. Наименьшие артерии называются артериолами. Кровь, в конце концов, достигает капилляров, где происходит обмен веществ с окружающими тканями. Затем капилляры собираются в венулы и вены, которые собираются в полые вены, откуда кровь из тканей поступает в сердце.

### **Основные параметры циркуляции крови**

В клинике наиболее часто исследуют давление и скорость течения крови.

Давление крови в артериях колеблется от максимального во время сокращения сердца (систолы) до минимального во время расслабления (диастолы). При каждом сердцебиении

давление крови поднимается до систолического уровня, а между ударами падает до диастолического уровня. Поэтому артериальное давление определяют как максимальное/минимальное значение (систолическое/диастолическое). Обычно его измеряют в миллиметрах ртутного столба. Среднее значение артериального давления для здоровых взрослых людей в состоянии покоя составляет 120/60 мм.рт.ст.

*Сфигмоманометр* – наиболее часто используемый прибор для измерения давления крови. Сфигмоманометр состоит из надувной манжеты, в которую с помощью резиновой груши нагнетают воздух, увеличивая в ней давление. Эта система связана с манометром, по шкале которого определяют артериальное давление пациента. Манжету фиксируют на плече, фонендоскоп устанавливают в локтевом сгибе.

Давление в манжете увеличивают до тех пор, пока в артерии не прекратиться ток крови. Затем давление в манжете медленно уменьшают. Когда оно достигнет максимального (систолического) значения, артерия частично открывается. Поскольку сечение артерии в этот момент меньше, чем обычно, в ней создается высокая скорость течения крови, и это течение является турбулентным. Поэтому фонендоскопом можно услышать звуки - тоны Короткова.

Если продолжать уменьшать давление в манжете, артерия в течение некоторого периода остается еще достаточно сжатой, по сравнению с нормальным состоянием.

Следовательно, тоны Короткова слышны до тех пор, пока давление в манжете не достигнет минимального (диастолического) значения. В этот момент кровь начинает свободно проходить через артерию. В артерии восстанавливается ламинарное течение крови, и тоны Короткова исчезают. Таким образом, измеряют максимальное и минимальное давление крови.

Скорость течения крови измеряют, используя эффект *эходопплерографии*. Как давление крови, так и скорость ее течения являются важными диагностическими показателями.

Давление и скорость течения крови в разных отделах кровеносной системы

Самое высокое давление в кровеносной системе в сердце. По закону Пуазейля:  $P_1 - P_2 = QR$ . Допустим, что  $P_1$  – давление крови в аорте и  $P_2$  - давление крови в полой вене, которое составляет около нуля мм.рт.ст. Следовательно, давление крови в аорте определяется двумя переменными.

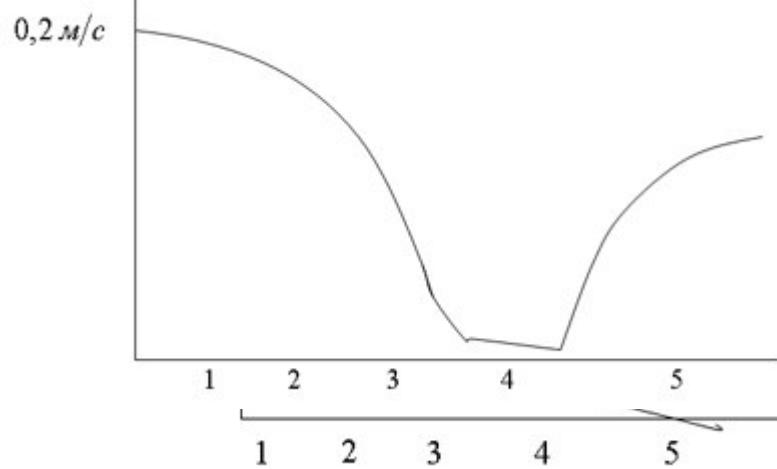
(1) Первая из них - объемная скорость жидкости ( $Q$ ) в аорте, величина которой зависит от частоты, мощности сердечных сокращений и объема в кровеносной системе.

(2) Вторая – общее сопротивление ( $R$ ) кровеносной системы.

Давление крови уменьшается с расстоянием от сердца из-за трения в кровеносных сосудах. Давление крови является мерой энергии, которую сообщает крови сердце. Эта энергия рассеивается при преодолении сопротивления кровеносных сосудов.

Гидродинамическое сопротивление разных частей кровеносной системы не одинаково. Сопротивление аорты и больших артерий составляет только около 19% общей величины сопротивления в системе. Самая большая доля сопротивления принадлежит артериолам (50%) и капиллярам (25%). Таким образом, на сосуды, длина которых составляет не несколько миллиметров, приходится более половины общего сопротивления циркуляторного русла. Сопротивление вены составляет около 7% общей величины сопротивления в кровеносной системе.

Величина гидродинамического сопротивления определяет падение давления крови по ходу сосудистого русла (Рис. 2). Среднее давление крови немного снижается в артериях (по отношению к давлению в аорте), но резкое его падение наблюдается в артериолах и капиллярах. Сопротивление артериол является одним из основных факторов,



определяющих величину артериального давления. Изменения давления крови в венах очень небольшие.

**Рис. 2.** Среднее давление крови в разных отделах кровеносной системы. 1. Аорта. 2. Артерии. 3. Артериолы. 4. Капилляры. 5. Вены.

Средние величины давления крови (мм.рт.ст.): 100 - в небольших артериях, 95 - при переходе из артерий в артериолы, 35-70 - при

поступлении крови из артериол в капилляры, 20-35 - в больших венах, 10 и менее - в мелких венах.

Скорость течения крови также значительно различается в разных отделах кровеносной системы (Рис. 3). Средняя величина скорости течения крови определяется уравнением неразрывности: она обратно пропорциональна общей площади поперечного сечения параллельно соединенных сосудов. Например, площадь поперечного сечения аорты составляет около 3,5-4,5, тогда как суммарная площадь поперечного сечения капилляров - в 600 раз большая. Поэтому средняя скорость крови составляет 0,2 в аорте и только 0,0003 в капиллярах. Небольшая скорость течения крови в капиллярах имеет большое значение для обмена веществ между кровью и окружающими тканями.

**Рис.3.** Средняя скорость течения крови в разных отделах кровеносной системы. 1. Аорта. 2. Артерии. 3. Артериолы. 4. Капилляры. 5. Вены.

## Лекция №5 (2 часа)

Тема: «Физические основы акустики. Биофизика инфразвука. Биофизика ультразвука.»

### 1.5.1 Вопросы лекции:

1. 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).
2. 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.
3. 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.
- 4.. 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.

### 1.5.2 Краткое содержание вопросов

## **Физические основы ультразвуковой диагностики**

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. Своё 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 трандюсера 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\*см<sup>2</sup>. 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, циунами. При помощи достаточн о 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 инфра звуковые волны в воздухе, воде и в земной коре могут распространяться на очень далёкие расстояния. Поскольку инфразвук слабо 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 стреляющ его 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 действующего 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 (в втором случае).

Следует принимать особые меры защиты против появления звуковых колебаний со следующими частотами, потому что

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 Шудейкиным голос моря <sup>[2]</sup>, образующуюся по принципу, схожему с формированием стоячей волны в трубе, у которой один конец открыт, а другой закрыт. Для такой трубы, открытой с одноконцом, 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  $h=v/4f+k*v/f$  ( $k=0, 1, 2, 3\dots$ ) и ровным донным рельефом, что соответствует глубинам около  $50 + 200*k$  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 трубы. В эксперименте [источник не указан 439 дней] показано, что даже небольшая, по сравнению с длинной 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, распределенными в пространстве помещения акустической волны. С точки зрения биологии контакт с разными раздражителями должен вызвать разную ответную реакцию органов и систем.

Экспериментально показано, что нахождение в разных частях даже небольшого помещения способны вызвать разнонаправленную реакцию органов и систем человека и животных. В выделена зона градиента ИЗ, в которой падает работоспособность, уменьшается частота различия звуковых импульсов и световых мельканий, резко активируется активность симпатического звена регуляции сосудистой системы и развивается реакция гиперкоагуляции крови. Это связано с прямым действием ИЗ на стенки кровеносных сосудов [источник не указан, ан 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 вод на гребне волн порождает акустический удар, создаются инфразвуковые колебания, расходящиеся на сотни километров, их улавливает медуза. Купол медузы усиливает инфразвуковые колебания, как рупор, передаёт 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 инфрауксомедузы. Такой прибор может предупредить о надвигающейся буре за 15 часов, а не за два, как обычный морской барометр.

### **Лекция №6 (2 часа)**

**Тема:** «Основы молекулярно-кинетической теории. Реальные газы.»

#### **1.6.1 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.

### 1.6.2 Краткое содержание вопросов

В МКТ пользуются идеализированной моделью – *идеальный газ*

Идеальным принято считать газ, если:

1) Газ состоит из мельчайших частиц – молекул, находящихся в непрерывном хаотическом движении, зависящим от температуры;

2) Размеры молекул малы по сравнению с расстоянием между ними поэтому их считают материальными точками;

3) Взаимодействие молекул только при соударениях (абсолютно упругие соударения).

### Газовые законы

Если параметры состояния не изменяются, то говорят, система находится в термодинамическом равновесии. Если изменяются параметры, то говорят совершаются *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 объем 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 - Льюссака* (изобарный процесс,  $P = \text{const}$ ). Объем данной массы газа при постоянном давлении изменяется линейно с температурой:

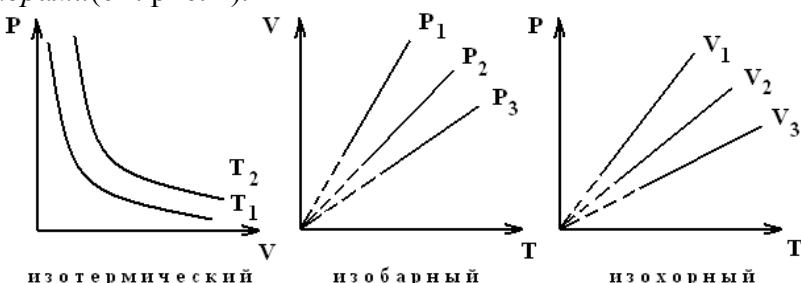
$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad (1.2)$$

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

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

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

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



### Рис. 1

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

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

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

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

Среди большого хаоса в движении молекул можно выделить величины характеризующие комплекс большого числа молекул. К ним относятся средняя скорость движения всех молекул, средняя энергия движения молекул. Эти величины характеризуют комплекс системы, но не совпадают с параметрами отдельных молекул. Молекулярно – кинетическая теория связывает макропараметры (объём, давление, температура) с микропараметрами движения ( $d, m, \bar{v}, E$  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;

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

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

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

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

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

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

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

Основная идея квантовой механики – величины, описывающие поведение молекул; энергия, импульс – квантованы, т.е. могут принимать только определение значения, могут изменяться не непрерывно, а отдельными порциями (квантами), вследствие этого появляются ряд таких явлений при  $T \rightarrow 0$  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 — количество вещества.

— — —

—

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

— (2.7)

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

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

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

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

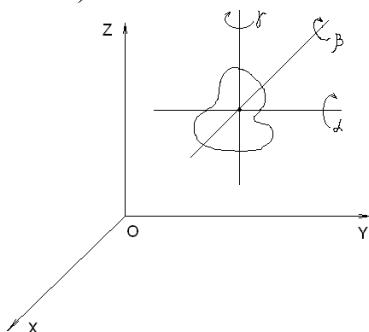


Рис. 5

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

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

Энергия поступательного движения молекул идеального газа определяется по формуле:

—

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

—

А полная кинетическая энергия молекул идеального газа:

— (2.8)

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

Для поступательного движения  $i=3$ . Вращательное движение так же описывается тремя степенями свободы. Для молекул идеального газа максимальное число степеней свободы:  $i=$

$$3_{\text{пост}} + 3_{\text{вн}} = 6$$

- 1) Если молекула одноатомная ( $O, N \dots$ ) то  $i=3$  (молекула подобна материальной точке)
- 2) Если молекула двухатомная ( $O_2, N_2 \dots$ ), то у неё нельзя не учитывать вращательную энергию (— — —), т.е. момент инерции такой молекулы уже не равен нулю. Такая молекула имеет вид гантели. Для неё вращательное движение имеет смысл только в двух направлениях  $OX$  и  $OZ$ , вдоль оси  $Y$  ( $I=0$ ), значит, двухатомная молекула имеет  $i=3+2=5$  — пять степеней свободы
- 3) Трёхатомная и многоатомная молекула ( $H_2O, N_2O \dots$ ) имеет 6 степеней свободы  $i=6$  — .

### 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:

Поскольку — , то в окончательном виде получим:

$$-- \quad (2.9)$$

Внутренняя энергия идеального газа данной массы газа зависит только от температуры, а её изменение — зависит от  $\Delta U = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} R \Delta t$  изменения температуры.

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

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

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

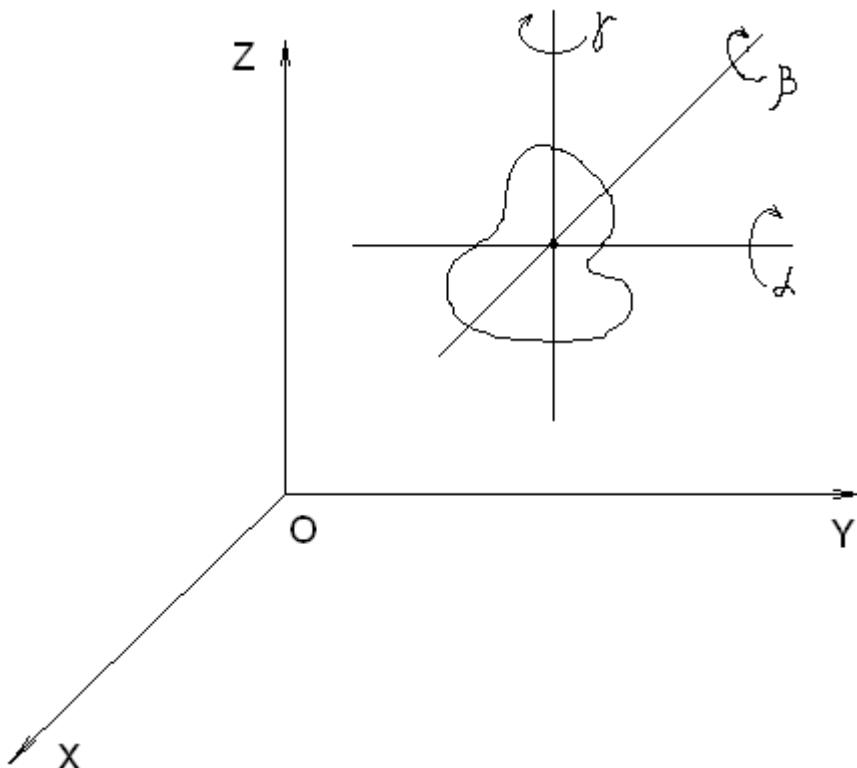


Рис. 2 – Число степеней свободы

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

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

Энергия поступательного движения молекул идеального газа определяется по формуле:

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

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

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

А полная кинетическая энергия молекул идеального газа:

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

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

Таблица 4 –Число степеней свободы для идеального газа

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

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

5) Если молекула двухатомная ( $O_2, N_2 \dots$ ), то у неё нельзя не учитывать вращательную энергию ( $E_{\text{полн}} = \frac{mv^2}{2} + \frac{I\omega^2}{2}$ ), т.е. момент инерции такой молекулы уже не равен нулю. Такая молекула имеет вид гантели. Для неё вращательное движение имеет смысл только в двух направлениях  $OX$  и  $OZ$ , вдоль оси  $OY$  ( $I = 0$ ), значит, двухатомная молекула имеет  $i = 3 + 2 = 5$  – пять степеней свободы  $\Rightarrow E = \frac{5}{2}kT$ .

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

### 2.1.6 Внутренняя энергия идеального газа

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

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

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

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

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

Внутренняя энергия идеального газа данной массы газа зависит от температуры, а её изменение  $\Delta U = \frac{i M}{2 \mu} R \Delta T$  обусловливается  $\Delta U = \frac{i m}{2 \mu} R \Delta t$  изменением температуры.

### 2.1.7 Закон Максвелла о распределении молекул идеального газа по скоростям

Изучая поведение большого числа хаотически движущихся частиц (к ним относятся и молекулы идеального газа) и используя законы статистики, Максвелл предложил формулу, с помощью которой можно определить относительное число молекул имеющих скорость, меняющее в определенном интервале скоростей от  $v$  до  $v + \Delta v$ .  $\frac{\Delta N}{\Delta v} = N \left( \frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} \exp[-mv^2/2kT] v^2$

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

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

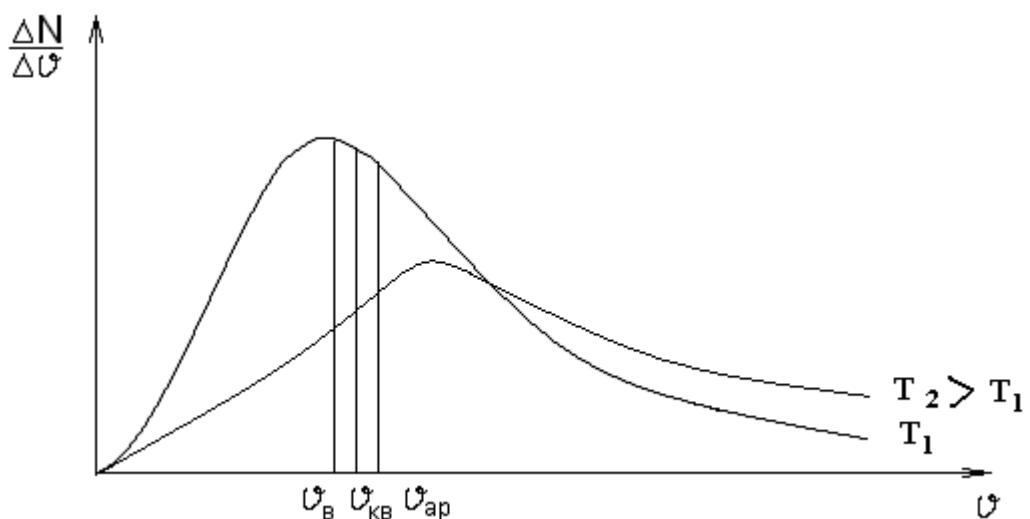


Рис. 3 – Распределение Больцмана

Анализ формулы и графика позволяет заключить:

- 1) Мало молекул, имеющих скорость близких к нулю и очень большие скорости.
- 2) Большинство молекул двигаются с определённой скоростью, на графике эта скорость соответствует максимуму кривой и называется *наиболее вероятной скоростью*, т.е.  $v_{\text{веп}} = \sqrt{\frac{2kT}{m}} = \sqrt{\frac{2RT}{\mu}} \cdot \frac{mv_{\text{веп}}^2}{2kT} = 1$ , т.е.  $v_{\text{веп}} = \sqrt{\frac{2kT}{m}} = \sqrt{\frac{2RT}{\mu}}$
- 3) Площадь, ограниченная под кривой соответствует общему числу молекул в данной массе газа.
- 4) При увеличении температуры максимум смещается в сторону больших скоростей и делается менее выраженным.
- 5) График несимметричен относительно экстремальной точки, так как кривая с осью  $v$  при больших скоростях не пересекается и лишь экспоненциально приближается к ней, т.е. ограничений в величине очень больших скоростей нет (этим, к примеру, объясняется испарение при любой температуре).

### 2.1.8 Скорости газовых молекул

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

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

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

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

3. *Средняя квадратичная скорость*  $v_{\text{KB}}^2 = \frac{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_n^2}{n}$ .

Её можно рассчитать, используя понятие энергии одной молекулы:

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

## 2.1.9 Барометрическая формула

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

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

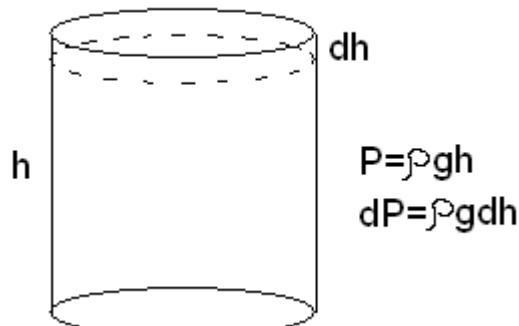


Рис. 4 – Газ в потенциальном поле Земли

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

$$\begin{aligned} dP &= \frac{P\mu}{RT} g dh \\ \frac{dP}{P} &= \frac{\mu g}{RT} dh \end{aligned}$$

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

Проинтегрируем и пропотенцируем полученную формулу:

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

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

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

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

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

—(1.19)

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

## Лекция №7 (2 часа)

Тема: «Физические основы термодинамики.»

### 1.7.1 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.

### 1.7.2 Краткое содержание вопросов

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:

(1.1)

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

(1.2)

Если система периодически возвращается в исходное состояние, то изменение её внутренней энергии равно нулю. 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* – это количество энергии отданное, или принятое телом (системой). Передача тепловой энергии возможна: конвекцией, излучением, теплопроводностью.

(1.3)

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

—(1.4)

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

—(1.5)

### Внутренняя энергия

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

-- (1.6)

1) Внутренняя энергия однозначно определяется параметрами состояния – является функцией состояния;

2) Изменение внутренней энергии – 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, совершающую при газовых процессах, можно рассчитать следующим образом.

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

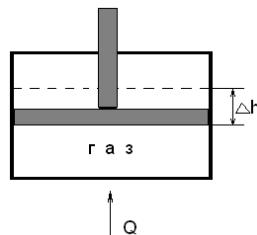


Рис. 8

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

$$A = \int_1^2 PdV \quad (1.7)$$

В случае если  $P = \text{const}$ :

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

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

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

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

#### Способы получения:

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

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

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

Внутренняя энергия меняется только за счёт совершения работы.

Опыт с «воздушным огнivом». 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.

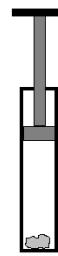


Рис. 9

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

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.

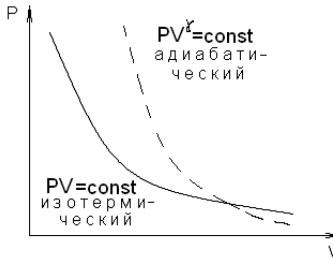


Рис. 10

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

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

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

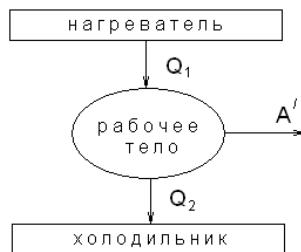


Рис. 11

$Q_1$  – 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:

1

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

#### § 5. Круговые процессы. Необратимые и обратимые процессы

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

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

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

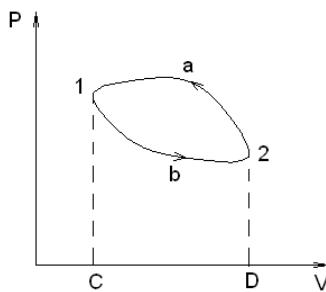


Рис. 12 – Круговой процесс

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

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

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

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

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

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

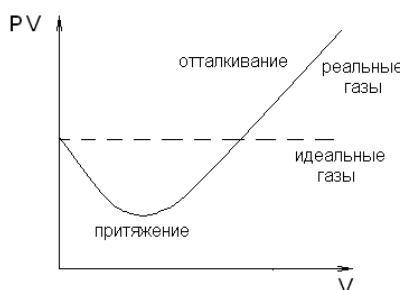


Рис. 14

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

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

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

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

Ввел поправки, учитывающие размеры молекул и их взаимодействие:

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

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

Здесь  $V_\mu$  – объём одного моля идеального газа,  $N_A$  – число Авогадро,  $V$  – объём одной молекулы,  $b = 4N_A V$  – поправка на объём, 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:

$$P = \frac{a}{V^2} \quad (6.2)$$

Здесь  $a$  – поправка, характеризующая взаимодействие молекул.

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

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

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

Уравнение состояния реального газа любой массы имеет вид:

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

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*

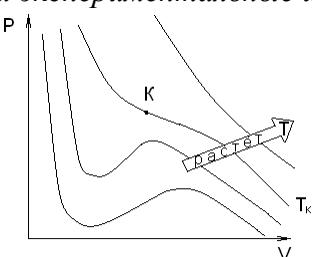


Рис. 15

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  $T_{\text{кр}}$  – 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  $T > T_{\text{кр}}$  никаким сжатием газ нельзя перевести в жидкое состояние. При температурах выше  $T_{\text{кр}}$  изотермы реального газа похожи на изотермы идеального газа.

В 1861 – 1869 гг. Т. Эндрюс проводил опыты по сжижению  $\text{CO}_2$ . Он исследовал ход изотерм углекислоты при различных температурах и на основании этих исследований ввёл понятие критической температуры для  $\text{CO}_2$  и она оказалась равной  $31^{\circ}\text{C}$  ( $304\text{ K}$ ). До этой температуры изотермы имели вид гиперболы, что соответствовало изотермам идеального газа. Ниже  $304\text{ K}$  на изотермах углекислоты появляются горизонтальные участки, на которых изотермическое сжатие газа приводит к его конденсации, но не к увеличению давления. Т. е. сжатый газ можно превратить в жидкость только если его температура ниже критической.

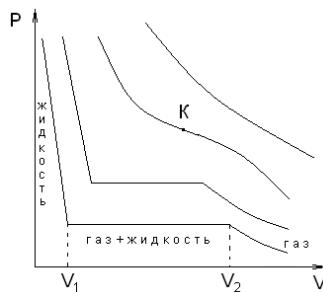


Рис. 16

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

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

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

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

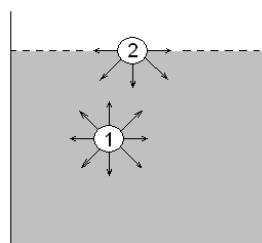


Рис. 17

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

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

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

Здесь  $\alpha$  – коэффициент поверхностного натяжения;  $\Delta S$  – 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  $\alpha$  численно равен работе, которую нужно совершить, чтобы при постоянной температуре, изменить площадь поверхностного слоя на  $1\text{м}^2$ :

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

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

Коэффициент поверхностного натяжения зависит от рода жидкости, температуры (с увеличением температуры  $\alpha$  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 №8 (2 часа)

Тема: «Основы термодинамики биологических процессов»

#### 1.8.1 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 неубывания энтропии.

#### 1.8.2 Краткое содержание вопросов

##### Основные определения

**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 в 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 объёме жидкости. Известно, что передача тепла будет происходить из области с более высокой температурой в область с более низкой температурой, пока постепенно во всём объёме 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.

Внутренняя энергия, работа и тепло

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, гелии) 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 твердому 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  $\Delta Q$ , переданную системе, и работу  $\Delta A$ , совершенную системой:  $\Delta Q = \Delta U + \Delta A$  (1)

Это уравнение является математическим выражением первого закона термодинамики. При передаче теплоты в систему  $\Delta Q$  положительно (при передаче теплоты системой  $\Delta Q$  отрицательно). Работа, совершенная системой считается положительной (работа, совершенная над системой - отрицательна).

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, аденоинтрифосфорной 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 1 грамме 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 энергию 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 (Клазиуса) 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.

## Энтропия

Направление спонтанных процессов в изолированных системах характеризуется параметром состояния, который называется *энтропией* (из греч. "преобразование"). Изменение энтропии системы  $dS$  определяется отношением теплоты  $dQ$ , введённой в систему или выведенной из системы, к абсолютной температуре  $T$  системы, при которой

$$\text{этот процесс происходит: } dS = dQ/T \quad (2)$$

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: *энталпию*  $H$ , *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.

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

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

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

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:

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

здесь  $\mu_0$  - 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,  $\phi$  - 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.

## Лекция №9 (2 часа)

Тема: «Электростатика. Законы постоянного тока»

### 1.9.1 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. Электроемкость проводника. Конденсаторы. Электроемкость клеточных мембран. Энергия СЭП.

### 1.9.2 Краткое содержание вопросов

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

Ещё в глубокой древности было известно, что янтарь, потертый о шерсть, притягивает легкие предметы [2]. Английский врач Джильберт (конец XVI в.) назвал тела, способные после натирания притягивать легкие предметы, *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:

1) Проводники – вещества в которых всегда имеются свободные заряды (металлы, растворы солей и электролиты).

2) 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).

3) Полупроводники – вещества, проводимость которых резко зависит от внешних условий (температура, освещенность, наличие примесей). Проводимость полупроводников может осуществляться как свободными, так и связанными зарядами. Наличие и концентрации зарядов в полупроводнике зависит от внешних факторов.

#### *3.1.1 Электрическое поле. Закон Кулона.*

##### *Напряженность электрического поля*

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

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

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

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

Величина, показывающая во сколько раз сила взаимодействия зарядов в данной среде меньше, чем в вакууме называется диэлектрической проницаемостью данной среды  $\epsilon$ . 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:

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

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

Данная запись закона Кулона позволяет определить направление силы.

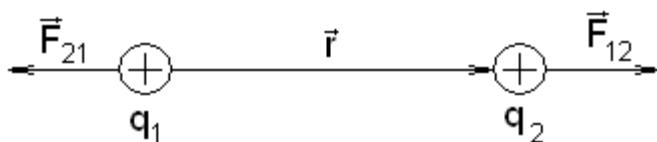


Рис. 1 – Взаимодействие зарядов

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

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 ( $\varphi$ ).

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  $\vec{F}$ .

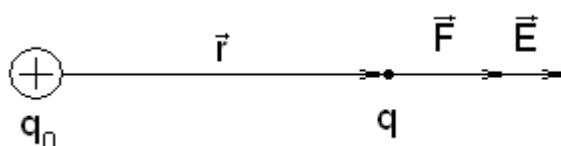


Рис. 2 – Направление вектора напряженности

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*.

$$\varphi = E_{\text{п}}/q \quad (1.5)$$

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.

### 3.1.2 Напряженность поля точечного заряда и диполя. Принцип суперпозиции полей

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

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

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

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

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

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

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

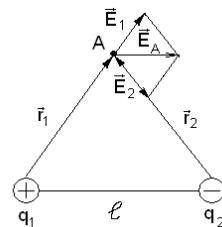


Рис. 3 – Электростатическое поле, созданное двумя зарядами

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  $\ell$  много меньше чем  $r$ , где  $\ell$  - плечо диполя.

Многие молекулы подобны диполю: молекула воды  $\text{H}_2\text{O}$ , молекула соляной кислоты  $\text{HCl}$ .

Напряженность поля диполя равна векторной сумме напряженностей полей, созданных положительными  $+\vec{E}_1$  и отрицательными зарядами  $-\vec{E}_2$  созданного положительными  $q_1$  и отрицательными зарядами  $q_2$

$$+\vec{E}_1 -\vec{E}_2$$

$$++\vec{E}_1 -\vec{E}_2$$

$$\vec{E}_{\text{об}} = \vec{E}$$

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*.

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

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

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

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

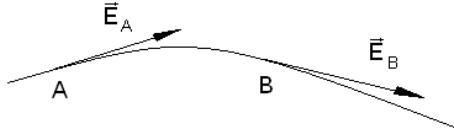


Рис. 4 – Силовые линии электростатического поля

*Силовые линии* имеют особенности:

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

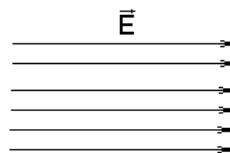


Рис. 5 – Однородное электростатическое поле

*Примеры графического изображения электростатических полей.*

1. Поле точечного заряда.

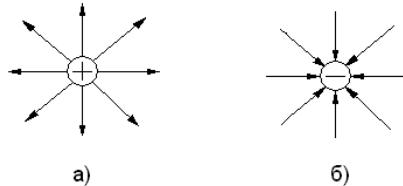


Рис. 6 – а) поле точечного положительного заряда

б) поле точечного отрицательного заряда

2. Поле двух разноименных зарядов.

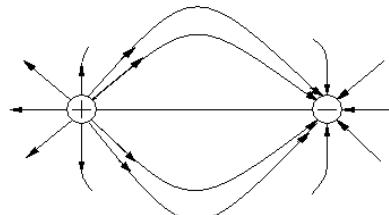


Рис. 7 – Графическое изображение электростатического поля диполя

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

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

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

здесь  $\alpha$  – угол между вектором  $E$  и  $n$  ( $n$  – нормаль к поверхности).

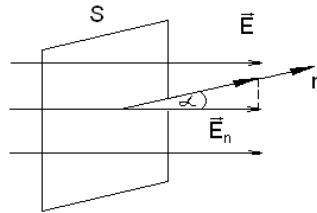


Рис. 8 – Поток вектора напряженности

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  $S$ .

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

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

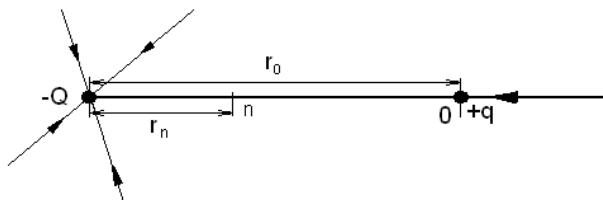


Рис. 11 – Работа перемещения точечного положительного заряда

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

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

где  $r$  – переменное расстояние между зарядами.

По определению:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Подставим формулу (1.21) в (1.19):

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

### 3.1.7 Электроемкость. Энергия электростатического поля. Изменение поля при внесении в него диэлектрика

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

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

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.

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

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

$$\Phi = \text{Кл/В}$$

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

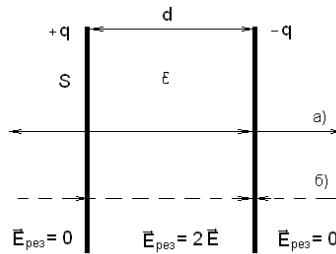


Рис. 16 – Плоский конденсатор

- a) силовые линии поля, созданные положительной пластиной;
- b) силовые линии поля, созданные отрицательной пластиной.

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

Электроемкость плоского конденсатора:

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

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

## Лекция №10 (2 часа)

Тема: «Электрические явления в биологических системах.»

### 1.10.1 Вопросы лекции:

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

### 1.10.2 Краткое содержание вопросов

2) **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 **трансмембранный, 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 миливольт (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**.

### Биофизические основы мембранного потенциала покоя

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 мембранны.

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

Этот факт дает возможность объяснить 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 мембранны в покое для ионов натрия мала.

Следовательно, снаружи клетка приобретает дополнительный положительный заряд и внутри остается 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 уравновешивается 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 мембранны.

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

Более точная величина мембранных потенциала покоя может быть вычислена из уравнения Гольдмана-Ходжкина, в котором учитываются концентрации и проницаемость мембранны 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 мембранных 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.

### Потенциал действия

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.

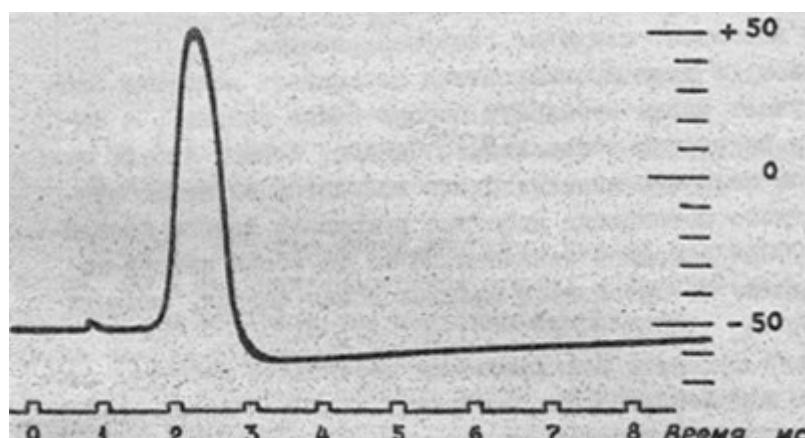


Рис. 1. Потенциал действия нервной клетки.

**Потенциал действия** - быстрое колебание величины мембранных 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 мембранныго потенциала, или овершут*). Затем мембранный потенциал возвращается к уровню мембранныго потенциала покоя (*этап реполяризации*) (рис.2.).

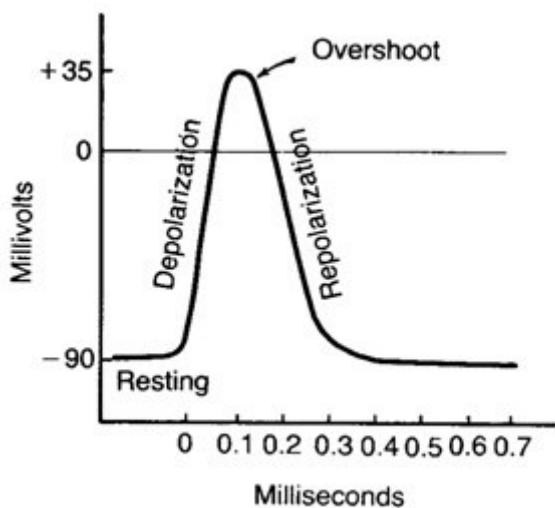


Рис. 2. Фазы потенциала действия

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.

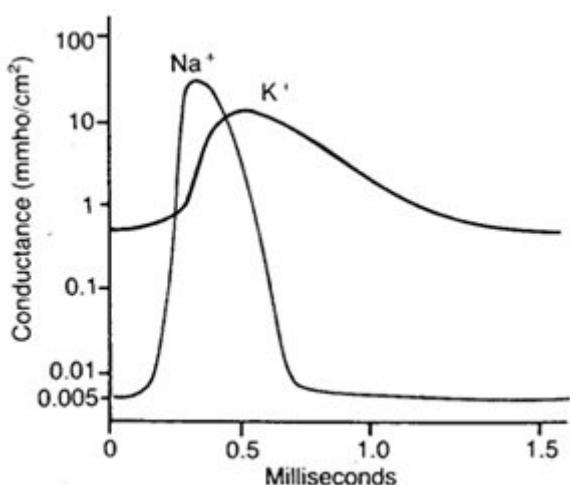


Рис. 3. Изменение проницаемости мембраны для ионов натрия и калия во время потенциала действия

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 мембранныго 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 мембранныго 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 управляетяется величиной мембранныго 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.

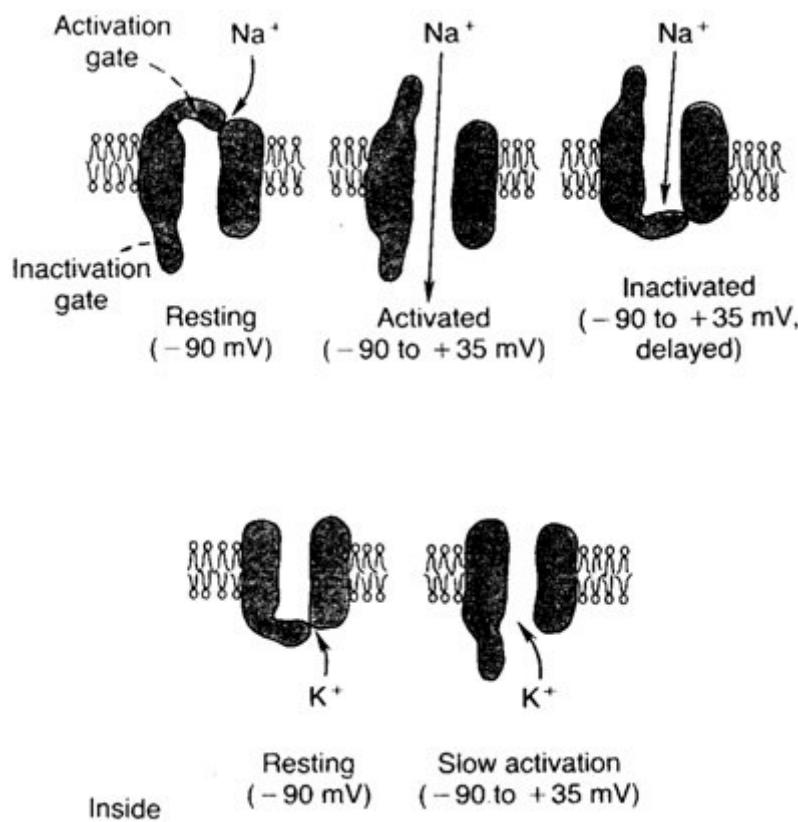


Рис. 4. Изменение состояния натриевых и калиевых каналов мембраны в зависимости от величины мембранныго потенциала

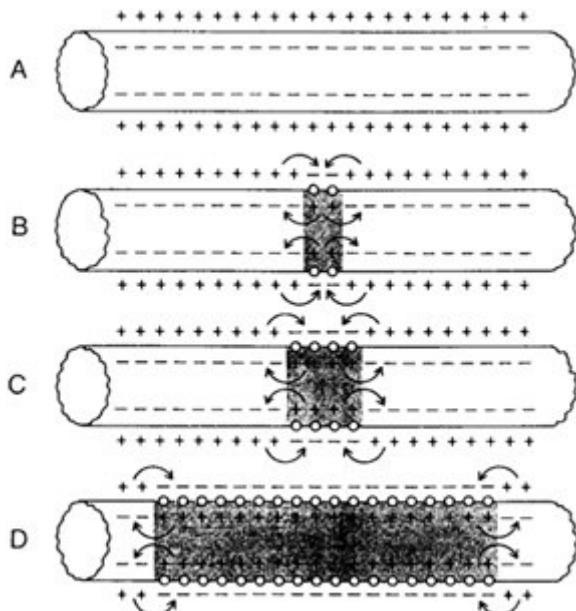
Распространение потенциала действия

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 мембранныго потенциала в зоне, прилегающей к месту возникновения потенциала действия.

Циклический локальный ток снижает заряд мембранны в неактивной зоне и деполяризует её. Если деполяризация достигает порогового уровня, то возрастает проницаемость мембранны 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 мембранны 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 №11 (2 часа)

Тема: «Магнитное поле тока в вакууме и в веществе»

### 1.11.1 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.

### 1.11.2 Краткое содержание вопросов

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

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

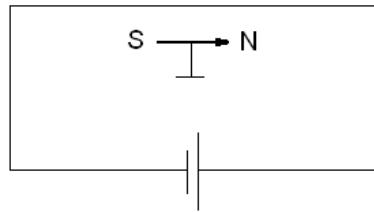


Рис. 27 – Магнитная стрелка вблизи проводника с током

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

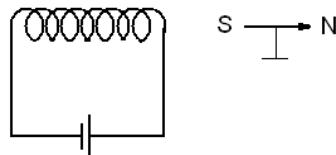


Рис. 28 – Магнитная стрелка вблизи катушки с током

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

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

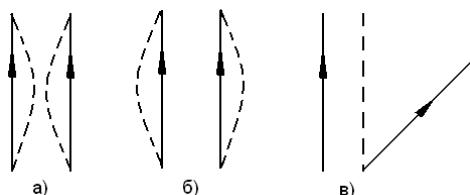


Рис. 29 – Взаимодействие токов

Проводники с током взаимодействуют друг с другом. Это и есть электромагнитное взаимодействие. Получим математическое выражение закона Ампера для силы магнитного взаимодействия токов. С помощью подвижных контуров, помещаемых в специальное приспособление («станок Ампера»), Ампер установил, что величина силы  $dF$  взаимодействия двух малых участков проводников (проводов) 1 и 2 с токами пропорциональна длинам  $dl_1$  и  $dl_2$  этих участков, силам тока  $I_1$  и  $I_2$  в них и обратно пропорциональна квадрату расстояния между участками. Дальнейшие экспериментальные исследования и теоретические расчеты Ампера и других ученых показали, что сила взаимодействия пропорциональна синусам углов  $\theta_1$  и  $\theta_2$ .

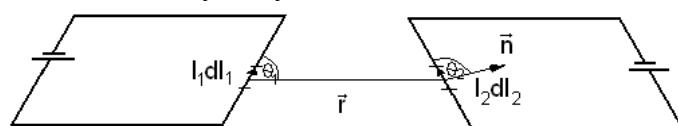


Рис. 30 – «Станок Ампера»

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

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).

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

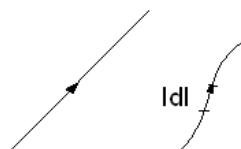


Рис. 31 – Проводник с током и пробный элемент тока

$$dF = BIdl \sin\theta, \quad (3.2)$$

где  $\theta$  – 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:

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

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

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

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

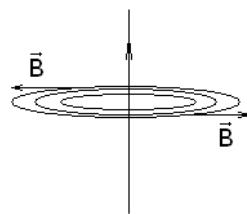


Рис. 32 – Магнитное поле прямого тока

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

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

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная,  $\mu$  – магнитная проницаемость среды, показывающая, во сколько раз магнитное поле макротоков  $H$  усиливается за счет поля микротоков среды.

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

$$dF = IBdlsin\theta, (3.7)$$

где  $\angle\theta = (d\hat{l}B)$

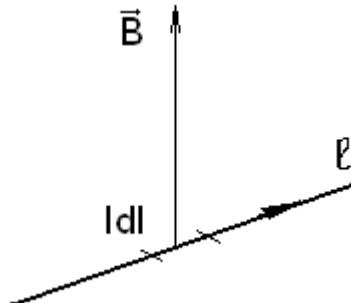


Рис. 34 – Проводник с током в магнитном поле

$$F = \int_l IBdlsin\theta$$

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

$$F = IBsin\theta \int_l dl = IlBsin\theta$$

$$F_A = IlBsin\theta (3.8)$$

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

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

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.

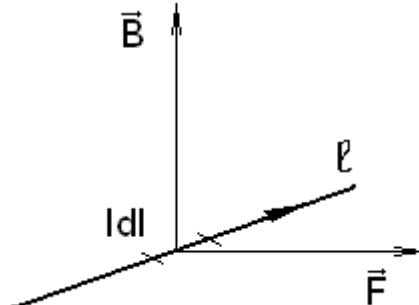


Рис. 35 – Действие силы  $F$  на проводник с током

## 1.12 Лекция №12 (2 часа)

**Тема:** «Электромагнитная индукция. Электромагнитные колебания и волны»

### 1.12.1 Вопросы лекции:

1. Опыты Фарадея по электромагнитной индукции. Закон Фарадея и правило Ленца.
2. Самоиндукция и индуктивность контура.
3. Энергия магнитного поля в катушке. Плотность энергии магнитного поля.
4. Колебательный контур Томсона. Формула Томсона для периода колебаний контура. Электромагнитная волна.
5. Законы Максвелла(формулировка) и их опытные обоснования. Перенос энергии волной. Вектор Умова-Пойнтинга.

### 1.12.2 Краткое содержание вопросов

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

Опыты:

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

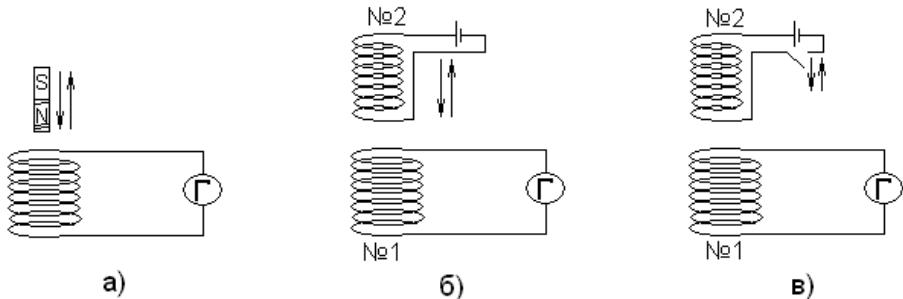


Рис. 42 – Опыты М. Фарадея

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

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

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

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

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

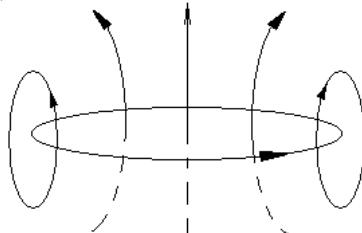


Рис. 43 – Замкнутый проводник в магнитное поле

Выводы:

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

2. Чем выше скорость пересечения линий индукции, т.е. чем больше число линий, пересекающих проводник в единицу времени, тем больше ток.

Максвелл, анализируя опыты Фарадея, несколько обобщил эти опыты:

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

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

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

Величина электродвижущей силы индукции (ЭДС)  $\varepsilon$  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).

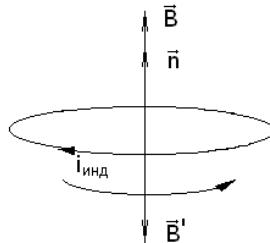


Рис. 44 – Применение правила Ленца

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

### 3.4.2 Самоиндукция. Взаимная индукция. Трансформаторы. Энергия магнитного поля

Самоиндукция и взаимная индукция являются частными случаями электромагнитной индукции.

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

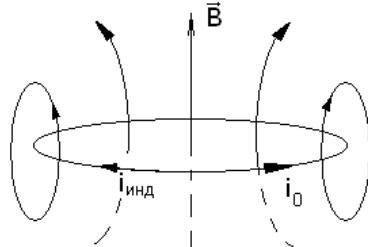


Рис. 45 – Замкнутый контур с переменным током  $i_0$

В итоге, магнитный поток  $\Phi$ , 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.

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

### Свойства электромагнитных волн

- Напряженность магнитного поля  $H$  колеблется перпендикулярно напряженности электрического поля  $E$  и скорости  $v$ ;

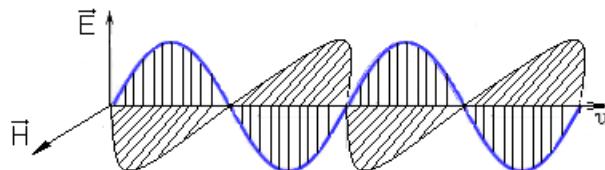


Рис. 49 –Электромагнитная волна

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

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0 \sqrt{\epsilon \mu}}} \quad (3.26)$$

В вакууме:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (3.27)$$

6. Для электромагнитных волн выполняется закон отражения и преломления.

Электромагнитная волна, распространяясь в пространстве, переносит энергию *без переноса вещества*. Количество энергии, переносимое волной за единицу времени через единицу площади:

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

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

### Лекция №13 (2 часа)

Тема: «Волновая оптика»

#### 1.13.1 Вопросы лекции:

- Интерференция света и способы ее наблюдения
- Дифракция света. Дифракционная решетка. Определение длины волны света дифракционной решеткой.
- Естественный и поляризованный свет. Законы Малюса и Брюстера. Призма Николя и поляроиды. Поляриметры и их применение в ветеринарной лабораторной практике.
- Спектры и их типы, спектральные закономерности. Спектральный анализ. Поглощение света. Законы Бугера и Бера. Метод колориметрии.

#### 1.13.2 Краткое содержание вопросов

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

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

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

Согласно корпускулярной теории (теории течения) свет представляет собой поток частиц (корпускул), испускаемых светящимися телами и летящих по прямолинейным траекториям. Движение световых корпускул Ньютона подчинил сформулированным им законам механики. Так, отражение света понималось аналогично отражению упругого шарика при ударе о плоскость, где также соблюдается закон равенства углов падения и отражения. Преломление света Ньютон объяснил притяжением корпускул преломляющей средой, в результате чего скорость корпускул меняется при переходе из одной среды в другую.

Из теории Ньютона следовало постоянство синуса угла падения  $\alpha$  к синусу угла преломления  $\beta$ :

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

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

Гюйгенса  $v$ .

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

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

$$E = hv$$

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

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

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

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

### Свойства света

#### Волновые

- отражение
- преломление
- интерференция
- поляризация
- дисперсия
- дифракция

#### Квантовые

- фотоэффект
- давление света
- атомные спектры
- люминесценция

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

Свет – единство дискретности и непрерывности.

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

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

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

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

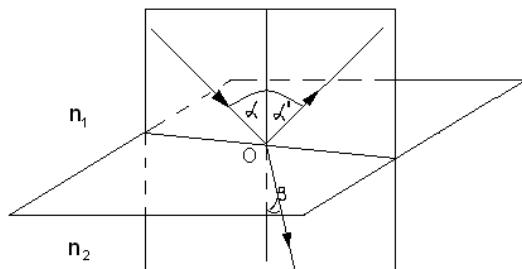


Рис. 50 – Граница раздела двух сред

*Закон отражения:*

1. Падающий, отраженный лучи и перпендикуляр, опущенный в точку падения луча, лежат в одной плоскости;

2. Угол падения  $\alpha$  равен углу отражения  $\alpha'$ .

*Закон преломления:*

1. Падающий, преломленный лучи и перпендикуляр, опущенный в точку падения луча, лежат в одной плоскости;

2. Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления равно отношению скорости света в первой среде к скорости света во второй среде:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{\vartheta_1}{\vartheta_2} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}, \quad (4.1)$$

где  $n_{21}$  – относительный показатель преломления.

#### 4.1.3 Линзы. Построение изображений с помощью линз

Раздел оптики, в котором законы распространения света рассматриваются на основе представлений о световых лучах, называется *геометрической оптикой*.

*Световой луч* – узкий канал, в котором распространяется энергия света.

Геометрическая оптика позволяет разрабатывать основные явления, связанные с прохождением света через оптические системы и является поэтому основой теории оптических приборов. Для изменения направления световых лучей в оптических приборах широко используют линзы (от лат. lens - чечевица).

Линзой называется прозрачное (чаще всего стеклянное) тело, ограниченное двумя криволинейными (обычно сферическими) поверхностями или одной криволинейной и одной плоской поверхностью.

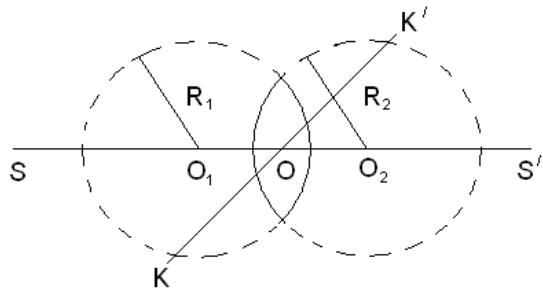


Рис. 52 – Линза

$O_1, O_2$  – центры кривизны линзы;  $R_1, R_2$  – радиусы кривизны; точка  $O$  – оптический центр линзы; прямая  $SS'$  – главная оптическая ось.

Любая прямая, проходящая через оптический центр линзы под углом к главной оптической оси, называется побочной оптической осью (в нашем случае  $KK'$ ).

Линза называется тонкой, если толщина её в центре радиуса кривизны  $R$ .

#### Свойства линз

1. Луч, идущий вдоль любой оптической оси, а также через оптический центр линзы, не преломляется;

2. Лучи, идущие параллельно главной оптической оси, после преломления могут:

а) сходиться в одной точке, которая называется *фокусом* (причем у линзы может быть двойной, тройной и т.д. фокусы);

б) расходиться, но их продолжение собирается в точке, называемой *мнимый фокус*.

По оптическим свойствам линзы делятся на собирающие (обозначаются ) и рассеивающие (обозначаются ).

Рассмотрим пример построения изображения с помощью собирающей и рассеивающей линзы.

*Пример 1.* Предмет  $KK'$  находится за фокусом собирающей линзы. В результате построения получаем изображение предмета  $KK'$  (см. рис. 53а):

а) действительное;

б) увеличенное;

в) обратное.

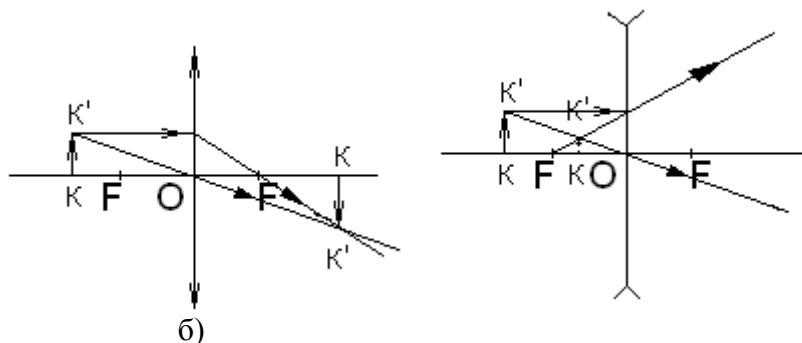


Рис. 53 – Построение изображения с помощью

а) собирающей линзы

б) рассеивающей линзы

*Пример 2.* Предмет  $KK'$  находится за фокусом рассеивающей линзы. В результате построения получаем изображение предмета  $KK'$  (см. рис. 53б):

- а) мнимое;
- б) уменьшенное;
- в) прямое.

Расстояние от оптического центра линзы до фокуса, называется *фокусным расстоянием*  $f$ . Величина обратная фокусному расстоянию, называется *оптической силой линзы*  $D$ :

$$D = 1/f \quad (4.3)$$

Единица измерения оптической силы линзы – диоптрия (дптр).

Формула тонкой линзы:

$$\pm \frac{1}{a} \pm \frac{1}{b} = \pm \frac{1}{f}, \quad (4.4)$$

где  $a$  – расстояние до предмета,  $b$  – расстояние до изображения, «+» – действительный предмет или изображение, «-» – мнимый предмет или изображение, «+» – оптическая сила линзы положительна, а «-» – отрицательна.

## Лекция №14 (2 часа)

Тема: «Тепловое излучение. Квантовый механизм излучения света»

### 1.14.1 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.

### 1.14.2 Краткое содержание вопросов

#### Тепловое излучение.

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  $T$ :  $r(v, T)$

##### 2. Интегральная энергетическая светимость.

Интегральная энергетическая светимость – мощность излучения с единицы площади поверхности тела во всем диапазоне частот:

показывает, сколько всего энергии излучается с единицы площади в виде  $\text{э}/\text{м}$  волн. Зная спектральную плотность энергетической светимости, можно вычислить интегральную энергетическую светимость (ее называют просто энергетической светимостью тела), просуммировав по всем частотам:

### 3. Спектральная поглощательная способность.

Пусть на элементарную площадку поверхности тела падает поток излучения энергии , приходящийся на интервал частот  $dv$ . Часть этого потока будет поглощена телом. Безразмерная величина

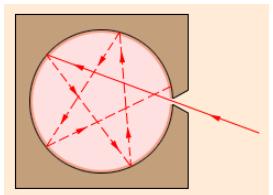
— называется спектральной поглощательной способностью тела.

По определению поглощательная способность тела не может быть больше единицы:

#### **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 .

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:

— универсальная функция Кирхгофа.

Для абсолютно черного тела , поэтому из закона Кирхгофа вытекает, что для черного тела равна . Таким образом, универсальная функция Кирхгофа 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  $\sigma=5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/\text{м}^2\text{К}^4$  – постоянная Стефана-Больцмана.

### Закон Вина.

В 1893 г. немецкий физик В. Вин сформулировал закон теплового излучения, согласно которому длина волны  $\lambda_m$ , на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела, обратно пропорциональна его абсолютной температуре:

$$\lambda_m = \frac{b}{T}$$

Где константа  $b=2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$  – 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  $\nu$ . Однако при больших частотах  $\nu$  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.

### Фотоэффект и его законы.

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  $\nu_0$  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. Фотоны.

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  $\nu$  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:

— 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

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):

— *масса фотона.*

Движущийся со скоростью  $c$  фотон обладает импульсом, величина которого связана с его энергией релятивистским соотношением  $\gamma$ . Отсюда следует, что

— *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 больше, чем длина волны падающего излучения.

Такой эффект увеличения длины волны рентгеновского излучения вследствие рассеяния его веществом получил название *эффекта Комптона*.

Опыты показали, что разность  $\Delta\lambda$  не зависит от длины волны к падающему излучению и природы рассеивающего вещества, а определяется только величиной угла рассеяния  $\theta$ :

— (1)

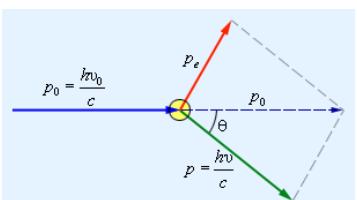
где  $\Lambda = 2,43$  пм — так называемая комптоновская длина волны, не зависящая от свойств рассеивающего вещества.

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:

— — (2)



Это выражение есть не что иное, как полученная экспериментально Комптоном формула (1). Подстановка в нее значений  $h$ ,  $m_e$  (масса электрона),  $c$  дает комптоновскую длину волны электрона  $\Lambda = 2,43$  пм.

Сравнение (1) с (2) показывает прекрасное совпадение выводов квантовой теории излучения и эксперимента.

### **Корпускулярно волновой дуализм света.**

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.

### **Лекция №15 (2 часа)**

**Тема: «Строение атома .Физика атомного ядра.»**

#### **1.15.1 Вопросы лекции:**

1. Планетарная модель атома . Теория Бора. Объяснение спектральных закономерностей.
2. Волновые свойства электрона. Формула де Бройля. Дифракция электронов.
3. Состав и характеристики атомного ядра. Нуклоны. Энергия связи нуклонов в ядре.
4. Явление радиоактивности. Закон радиоактивного распада. Альфа, бета и гамма-излучения. Их свойства. Биологическое действие ионизирующих излучений.
5. Биологическое действие ионизирующих излучений.

#### **1.15.2 Краткое содержание вопросов**

Подозрение о том, что все тела состоят из атомов возникло ещё 2000 лет назад в Греции (от греч. атомос – неделимый).

В начале XIX в. стало ясно, что без атомных представлений вещества не обойтись. Как устроен атом? На тот момент не было экспериментальных данных. С открытием рентгеновских лучей, катодных лучей (пучок электронов), исследовали влияние электрических и магнитных полей на оптические явления. Когда были открыты закономерности в оптических спектрах, возникла необходимость рассуждать на тему, как устроен атом. К началу XX в. было с полной достоверностью установлено:

1. Атом в целом электронейтрален;
2. В состав атома входят отрицательно заряженные электроны.

В 1904 г. Д. Томсон высказал гипотезу о том, как устроен атом. Открыв в 1897 году электрон, Томсон предположил, что «корпускулы»(так Томсон называл электроны, хотя ещё в 1894 году Дж. Дж. Стоуни предложил называть «атомы электричества»

электронами) являются составными частями атома и решил создать модель атома, отражающую это предположение. С точки зрения Томсона:

...атомы элементов состоят из нескольких отрицательно заряженных 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 заряженному «изюминкам» в положительно заряженном «пудинге». Электроны, как предполагалось, были распределены по всему атому.

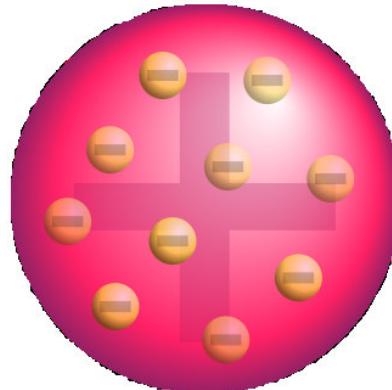


Рис. 90 – «Пудинговая модель атома» по Томсону

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.

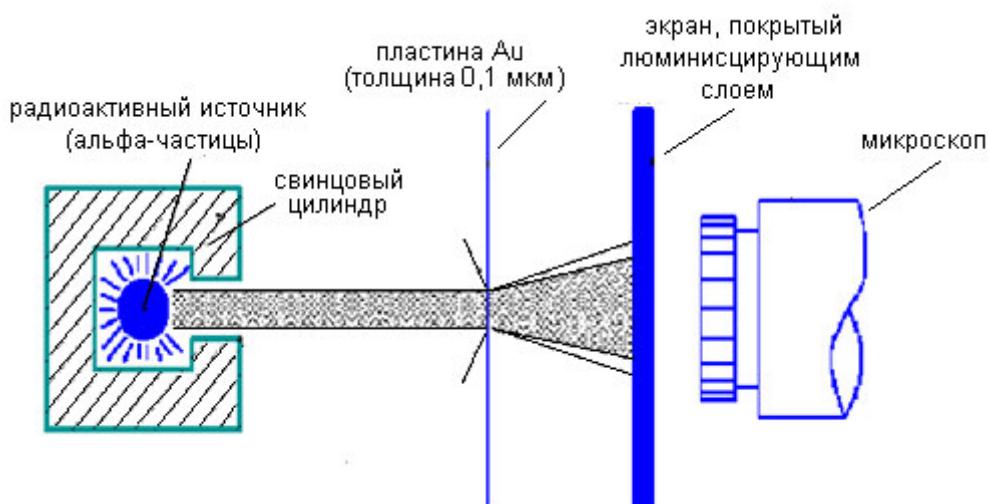


Рис. 91 – Опыт Резерфорда

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 «крыхлый, пустой».

Эрнестом Резерфордом в результате эксперимента с рассеиванием альфа-частиц была предложена модель строения атома – *планетарная модель атома*. По этой модели атом состоит из небольшого положительно заряженного ядра, в котором сосредоточена почти вся масса атома, вокруг которого движутся электроны, – подобно тому, как планеты движутся вокруг Солнца.

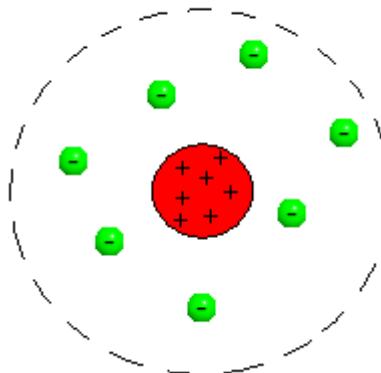


Рис. 92 – Планетарная модель Резерфорда

Недостатком планетарной модели была её *несовместимость* с законами классической физики. Если электроны движутся вокруг ядра как планеты вокруг Солнца, то их движение ускоренное, и, следовательно, по законам классической электродинамики они должны были бы излучать электромагнитные волны, терять энергию и падать на ядро. Следующим шагом в развитии планетарной модели стала *модель Бора*, постулирующая другие, отличные от классических, законы движения электронов. Полностью противоречия электродинамики смогла решить квантовая механика.

*Постулаты Бора* – основные допущения, сформулированные Нильсом Бором в 1913 году для объяснения закономерности линейчатого спектра атома водорода и водородоподобных ионов (формула Бальмера-Ридберга) и квантового характера испускания и поглощения света. Бор исходил из планетарной модели атома Резерфорда.

#### *Постулаты:*

1. Атом может находиться только в особых 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.

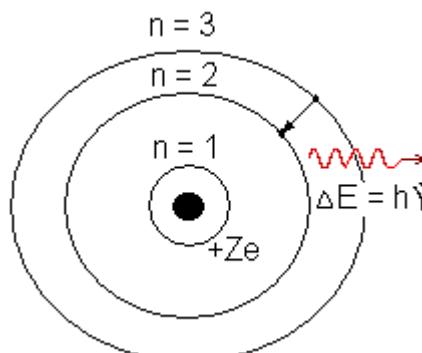


Рис. 93 – Модель атома Бора

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  $\alpha$ - и  $\beta$ -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  $\alpha$ - и  $\beta$ -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-спектрскопических измерений; ее величина в 1836 раз больше массы электрона. Энергия покоя протона равна 938 Мэв. Масса нейтрона  $m_n$  известна из масс-спектрскопических 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 слагается 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  ${}^A_Z X$ , где X – символ элемента, A – массовое число, Z – атомный номер. Например:  ${}^4_2 He$  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 > 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 > это силы особой природы.

### Свойства ядерных сил:

1. Являются силами притяжения;
2. Короткодействующие ( $R10^{-15}$  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:

$$m_a < Zm_p + (A - Z)m_n \quad (4.41)$$

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m_a \quad (4.42)$$

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*.

$$E_{cb} = \Delta mc^2, \quad (4.43)$$

где  $c$  – скорость света в вакууме.

Энергия связи ядра, приходящаяся на один нуклон, называется *удельной энергией связи ядра*:

$$\varepsilon = E_{cb}/A \quad (4.44)$$

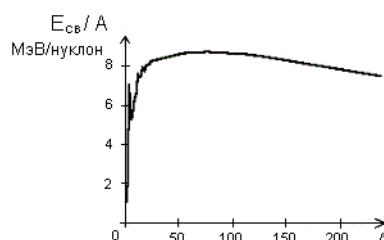


Рис. 94 – Зависимость удельной энергии связи ядра  
от массового числа

≈ 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  $>$  при слиянии легких ядер в тяжелые, энергия выделяется (синтез). При делении тяжелых ядер, энергия выделяется.

#### 4.3.3 Естественная и искусственная радиоактивность. Ядерные реакции. Закон радиоактивного распада. Методы наблюдения и регистрации радиоактивных излучений

Стабильными называются ядра, состав которых со временем не меняется. Наиболее устойчивыми являются ядра легких элементов, состоящие из приблизительно одинакового числа протонов и нейтронов. У самых тяжелых элементов (расположенных в периодической таблице после свинца), ядра которых состоят из большого числа нуклонов (с преобладанием нейтронов), ядерные силы уже не обеспечивают устойчивости ядра. Такие ядра могут *самопроизвольно* распадаться, превращаясь в ядра более легких элементов. Это явление носит название *естественной радиоактивности* (была открыта в 1896 г. французским физиком Беккерелем). Своим открытием Беккерель делится с учёными, с которыми он сотрудничал. В 1898 г. Мария Кюри и Пьер Кюри обнаружили радиоактивность тория, позднее ими были открыты радиоактивные элементы полоний и радий. Они выяснили, что свойством естественной радиоактивности обладают все соединения урана и в наибольшей степени сам уран.

Рассмотрим несколько случаев типичной нестабильности (неустойчивости). В него входят три различных вида излучения –  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  – лучи.

1.  $\alpha$  – распад – самопроизвольное превращение ядра с испусканием  $\alpha$  частицы ( ${}^4_2He$ ). Энергетический спектр – линейчатый.

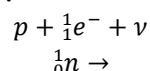
Пример:



В результате получается химический элемент, со смещением влево на две клетки в периодической таблице Д.И. Менделеева. При  $\alpha$  – распаде, почти мгновенно испускаются несколько  $\gamma$  – квантов. Испускаемые  $\alpha$  и  $\gamma$  – лучи определенные  $>$  спектр линейчатый.

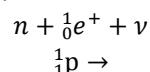
2.  $\beta$  – распад.

а) электронный  $\beta$  – распад. Пример:



В результате получается химический элемент, со смещением вправо на одну клетку в периодической таблице Д.И. Менделеева ( $Z+1$ ).

б) позитронный  $\beta$  – распад. Пример:



В результате получается химический элемент, со смещением влево на одну клетку в периодической таблице Д.И. Менделеева ( $Z-1$ ).

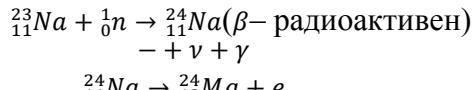
При  $\beta$  – распаде энергетический спектр сплошной.

3. Термин «гамма-распад» применяется редко; испускание ядром гамма-квантов называют обычно *изомерным* переходом. Гамма-излучение часто сопровождает другие типы распада, когда в *результате* первого этапа распада возникает дочернее ядро в возбуждённом состоянии, затем испытывающее переход в основное состояние с испусканием гамма-квантов.

*Искусственная радиоактивность* – радиоактивность изотопов, полученных в результате ядерной реакции.

*Ядерная реакция* – процесс превращения атомных ядер, обусловленный воздействием на них быстрых элементарных частиц (или ядер других атомов).

Любое стабильное ядро можно сделать искусственно радиоактивным, если вогнать в него избыточную частицу. Впервые это удалось Ф.Ж. Кюри в 1934 г. У легких ядер массовое число меньше пятидесяти ( $A < 50$ ), если у них искусственно создать избыток нейтронов над протонами, то такие ядра становятся  $\beta$ -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  $1\text{Гр(грэй)} = 1\text{Дж/кг}$ .

Разные виды излучения при одной дозе излучения могут вызвать разные биологические действия > вводят *коэффициент качества* – во сколько раз данное излучение действует сильнее  $\beta$ ,  $\gamma$  излучений.

Коэффициент качества умножают на дозу излучения получают *эквивалентную дозу излучения*. В СИ  $1\text{Зв}$  (зиверт).  $1\text{Зв}$  – это излучение любого вида, действие которого на живую ткань эквивалентно действию  $1\text{Гр}$ .

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 распадется. 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  $\lambda$  – коэффициент пропорциональности, называемый *постоянной распада* данного элемента. Знак «минус» показывает уменьшение числа атомов радиоактивного элемента со временем.

$$\begin{aligned} \int_{N_0}^N dN &= - \int_0^t \lambda N dt \\ \int_{N_0}^N dN/N &= -\lambda \int_0^t dt \\ N &= N_0 e^{-\lambda t}, \end{aligned} \tag{4.45}$$

где  $N_0$  – число атомов в начальный момент времени;  $N$  – число атомов по истечении времени  $t$ . Выражение (4.45), называется *законом радиоактивного распада*.

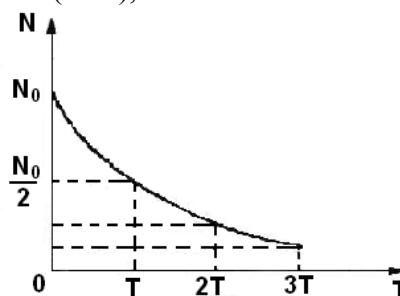


Рис. 95 – Закон радиоактивного распада

Для характеристики быстроты распада радиоактивного элемента вводится понятие *периода полураспада*. *Периодом полураспада*  $T$  называется время в течение которого количество атомов исходного элемента уменьшается вдвое.

$$e^{-\lambda T} = 1/2 \Rightarrow T = \ln 2 / \lambda = 0,693 / \lambda \tag{4.46}$$

Величина  $\tau$ , обратно пропорциональная постоянной распада, представляет *среднее время жизни* радиоактивного атома:

$$\tau = 1/\lambda > T = \tau \cdot \ln 2$$

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* 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 1 г радия, получившая название *киори*:

$$1 \text{ Ки} = 3,710^{10} \text{ расп/с}$$

## 2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

### 2.1 Лабораторная работа № 1 (2 часа).

**Тема:** «Вращательное движение твердого тела»

**2.1.1 Цель работы:** Изучить вращательное движение твёрдого тела

**2.1.2 Задачи работы:**

1. Ознакомиться с понятием вращательное движение твёрдого тела.

**2.1.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:**

штатив с отвесом и горизонтальной осью, секундомер, шатун, крючки с нитями, масштабная линейка

**2.1.4 Описание (ход) работы:**

1. Значение массы шатуна выбито на шатуне в граммах. По этому значению вычислить вес шатуна в Ньютонах в положении равновесия.

2. Отметить на шатуне центр тяжести О. Для этого шатун подвесить на крючках так, как показано на рис. 1 а. Положение центра тяжести определится как точка пересечения отвесной линии с осью симметрии шатуна.

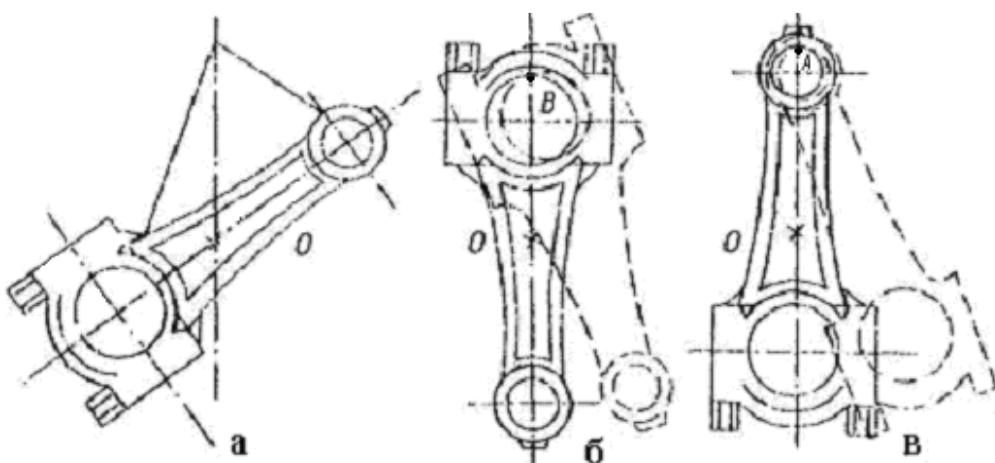


Рис. 1

3. Подвесить шатун так, как показано на рис. 1 б (ось вращения шатуна проходит через точку В) и, определив время десяти колебаний, найти период колебания шатуна  $T_B$  относительно оси, проходящей через точку В (шатун отклоняется от положения равновесия на 3-5°) ( $T_B = \frac{t}{10}$ ).

4. Измерить масштабной линейкой расстояние  $r_{B0} = BO$ .

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  $r_{A0} = AO$  и вычислить момент инерции шатуна относительно оси, проходящей через точку А ( $J_A$ ).

7. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу.

	m	p	n	t	T	r	J	$J_0$
--	---	---	---	---	---	---	---	-------

Относительно оси, проходящей через точку В. Относительно оси, проходящей через точку А.								
--------------------------------------------------------------------------------------------------	--	--	--	--	--	--	--	--

8. Вычислить  $J_0$  шатуна:  $J_0 = J_A - r_{A0}^2 m; J_0 = J_B - r_{B0}^2 m$  для двух положений шатуна и его среднее значение.

Найти абсолютную и относительную погрешности вычислений момента инерции шатуна  $J_0$  относительно оси, проходящей через центр масс.

## 2.2 Лабораторная работа № 2 (2 часа).

**Тема:** «Механические колебания»

**2.2.1 Цель работы:** Определить механическое колебание

**2.2.2 Задачи работы:**

1. Определить коэффициент жесткости пружины по колебаниям

**2.2.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:**

кронштейн с пружиной и со шкалой, набор грузов, секундомер.

**2.2.4 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. Проделать 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 Т колебаний груза от его массы  $T = f(m)$ .

**Задание 3.** По формуле  $k' = \omega^2 m = \frac{4\pi^2 m}{T^2}$  рассчитать значение  $k'$  для 3-х нагрузок и вычислить  $k'_{\text{ср}}$ . Полученное значение  $k'_{\text{ср}}$  сравнить со значением  $k_{\text{ср}}$ , рассчитанным по деформации.

Расчет по колебаниям			Расчет по деформации	
$m$	$k' = \frac{4\pi^2 m}{T^2}$	$k'_{\text{ср}}$	$k = \frac{mg}{x}$	$k_{\text{ср}}$

### 2.3 Лабораторная работа № 3 (2 часа).

**Тема:** «Физические основы гемодинамики. Механика сердечно-сосудистой системы»

#### 2.3.1 Цель работы:

1. Ознакомиться с физическими основами гемодинамики

#### 2.3.2 Задачи работы:

1. Ознакомиться с устройством прибора Стокса

2. Определить коэффициент вязкости масла

#### 2.3.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

прибор Стокса, ареометр, пипетка, исследуемая жидкость (масло).

#### 2.3.4 Описание (ход) работы:

Прибор Стокса представляет собой цилиндр, наполненный исследуемой жидкостью с двумя кольцевыми метками **M** и **N**, которые могут перемещаться вдоль цилиндра.

Телами шарообразной формы служат капли воды, выпускаемые пипеткой на поверхность исследуемой жидкости. Верхняя кольцевая метка **M** 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 **MN** 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  $\eta$ .

Результаты измерений и вычислений заносят в таблицу.

№	$r, \text{мм}$	$S, \text{м}^2$	$t, \text{с}$	$\rho, \text{кг}/\text{м}^3$	$\rho_1, \text{кг}/\text{м}^3$	$\eta, \text{Па}^*\text{с}$	$\eta_{\text{ср}}, \text{Па}^*\text{с}$
1							
2							
3							

Значение радиуса шарика указано на установке.

Сформулируйте вывод по данной работе.

## **2.4 Лабораторная работа № 4 (2 часа).**

**Тема:** «Основы молекулярно-кинетической теории. Реальные газы»

### **2.4.1 Цель работы:**

- 1.Знакомство с явлением диффузии на основе компьютерной модели
2. Ознакомится с основами молекулярно-кинетической теории

### **2.4.2 Задачи работы:**

1. Заполнить таблицу №2

### **2.4.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:**

Персональные компьютеры

### **2.4.4 Описание (ход) работы:**

Описание (ход) работы, используя ПО «Виртуальный практикум по физике в 2 частях»

## **2.5 Лабораторная работа № 5 (2 часа).**

**Тема:** «Физические основы термодинамики»

### **2.5.1 Цель работы:**

- 1.Ознакомится с физическими основами термодинамики

### **2.5.2 Задачи работы:**

1. Заполнить таблицу №2

### **2.5.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:**

Персональные компьютеры

### **2.5.4 Описание (ход) работы:**

Описание (ход) работы, используя ПО «Виртуальный практикум по физике в 2 частях»

## **2.6 Лабораторная работа № 6 (2 часа).**

**Тема:** «Основы термодинамики биологических процессов»

**2.6.1 Цель работы:** 1. Знакомство с адиабатическим процессом в идеальном газе и его компьютерной моделью

2. Экспериментальное подтверждение закономерностей адиабатического процесса

### **2.6.2 Задачи работы:**

1. Заполнить таблицу №2,3

### **2.6.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:**

Персональные компьютеры

### **2.6.4 Описание (ход) работы:**

Описание (ход) работы, используя ПО «Виртуальный практикум по физике в 2 частях»

### **2.7 Лабораторная работа № 7 (4 часа).**

**Тема:** «Электростатика. Законы постоянного тока»

**2.7.1 Цель работы:** Экспериментальное подтверждение закономерностей для электрического поля точечного заряда и электрического диполя.

#### **2.7.2 Задачи работы:**

1. Вычислите и запишите в табл. 2 и 3 значения всех характеристик
2. Построить график зависимости диполя от логарифма расстояния.

#### **2.7.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:**

Персональные компьютеры

#### **2.7.4 Описание (ход) работы:**

Описание (ход) работы, используя ПО «Виртуальный практикум по физике в 2 частях»

### **2.8 Лабораторная работа № 8 (4 часа).**

**Тема:** «Магнитное поле тока в вакууме и в веществе Последовательное и параллельное соединения проводников»

**2.8.1 Цель работы:** Экспериментальное подтверждение закономерностей для магнитного поля прямого провода и кругового витка с током.

#### **2.8.2 Задачи работы:**

1. Заполнить таблицу 2 и 3.
2. Построить график зависимости индукции прямого провода с током от обратного расстояния.

#### **2.8.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:**

Персональные компьютеры

#### **2.8.4 Описание (ход) работы:**

Описание (ход) работы, используя ПО «Виртуальный практикум по физике в 2 частях»

### **2.9 Лабораторная работа № 9 (2 часа).**

**Тема:** «Электромагнитная индукция. Электромагнитные колебания и волны»

**2.9.1 Цель работы:** Изучить зависимость сопротивления лампы накаливания от тока накаливания

#### **2.9.2 Задачи работы:**

1. Сборка электрической цепи
2. Расчет сопротивления лампы накаливания при различной нагрузке

3. Построить графики зависимости тока от напряжения и сопротивления нити накаливания от тока ( $I = f(U)$  и  $R = f(I)$ )

#### 2.9.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. Электрическая лампочка 2. Потенциометр 3. Амперметр 4. Вольтметр

#### 2.9.4 Описание (ход) работы:

1. Собрать схему (рис.1), включить в нее лампу накаливания с вольфрамовой нитью.



2. Поставить ползунок (под нижний контакт) потенциометра в положение 1, чтобы при включении схемы ток через лампу накаливания был минимальным.

3. После проверки схемы преподавателем подключить ее к источнику напряжения.

4. Постепенно увеличивая ток в лампе накаливания, снять показания вольтметра и амперметра для 6-8 точек.

5. По формуле (2) определить сопротивление нити.

6. Результаты измерения занести в таблицу.

№ п/п	Напряжение на лампе (В)	Ток через лампу (А)	Сопротивление лампы (Ом)
1.			
2.			
3.			

7. Построить графики зависимости тока от напряжения и сопротивления нити накаливания от тока ( $I = f(U)$  и  $R = f(I)$ )

8. Сделать выводы.

9. Проделать то же самое для другой лампы.

## **2.10 Лабораторная работа № 10 (4 часа).**

**2.12 Тема:** «Волновая оптика»

**2.10.1 Цель работы:** Экспериментальное подтверждение закономерностей для магнитного поля прямого провода и кругового витка с током.

### **2.10.2 Задачи работы:**

1. Заполнить таблицу 2 и 3.
2. Построить график зависимости индукции прямого провода с током от обратного расстояния.

### **2.10.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:**

Персональные компьютеры

### **2.10.4 Описание (ход) работы:**

Описание (ход) работы, используя ПО «Виртуальный практикум по физике в 2 частях»

## **2.11 Лабораторная работа № 11 (2 часа).**

**Тема:** «Тепловое излучение. Квантовый механизм излучения света»

**2.11.1 Цель работы:** Экспериментальное подтверждение закономерностей ЭМИ

### **2.11.2 Задачи работы:**

1. Заполнить таблицу 2, 3, 4.
2. Построить график зависимости тока индукции от скорости движения перемычки.

### **2.11.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:**

Персональные компьютеры

### **2.11.4 Описание (ход) работы:**

Описание (ход) работы, используя ПО «Виртуальный практикум по физике в 2 частях»

### 3. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ПРОВЕДЕНИЮ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

#### 3.1 Практическое занятие №1 (2 часа).

**Тема:** «Строение атома. Физика атомного ядра»

##### 3.1.1 Задание для работы:

1. В чём сущность опыта Резерфорда? Каковы недостатки планетарной модели атома Резерфорда?
2. Строение ядра атома. Ядерные силы.
3. Сформулируйте постулаты Бора.
4. Уровни энергии в атоме водорода. Правило частот Бора.
5. Естественная и искусственная радиоактивность.  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  распад. Ядерные реакции.
6. Закон радиоактивного распада.
7. Что называется активностью радиоактивного вещества?
8. Что такое изотопы? Чем отличаются друг от друга их ядра?
9. Использование ядерной энергетики.

#### *Основные законы и формулы*

Наименование	Формула
1	2
Сериальная формула для атома водорода	$v = \frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right)$
Период полураспада	$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}$
Активность радиоактивного изотопа	$a = \lambda N = N \frac{0,693}{T_{1/2}}$
Дефект массы ядра	$\Delta m = Zm_P + (A - Z)m_{\Pi} - m_{\text{я}}$ $\Delta m = Zm_{\frac{1}{1} H} + (A - Z)m_{\Pi} - m_A$
Энергия связи ядра	$E_{\text{СВ}} = \Delta m c^2$ , $E_{\text{СВ}} = 931 \Delta m$
Удельная энергия связи	$\varepsilon = \frac{E_{\text{СВ}}}{A}$

#### *Примеры решения задач*

**Пример 1.** Навеска почвы, в которую внесено удобрение с радиоактивным фосфором  $^{32}_{15} \text{P}$ , имеет активность  $a = 10 \text{ мКи}$ . Определить массу  $t$  радиоактивного фосфора в навеске. Период полураспада изотопа  $T_{1/2} = 14,28 \text{ дня}$ .

**Решение.** Массу радиоактивного вещества можно определить из формулы:

$$N = \frac{m}{M} N_A, \quad (1)$$

где  $N$  – число атомов (ядер);  $\frac{m}{M}$  – число молей;  $m$  – масса вещества;  $M$  – масса моля;  $N_A$  – постоянная Авогадро.

Из формулы (1) определим:

$$m = \frac{NM}{N_A} (2)$$

Число атомов (ядер)  $N$  связано с активностью вещества соотношением:

$$a = \lambda N, \quad (3)$$

где  $\lambda$  – постоянная распада, связанная с периодом полураспада зависимостью:

$$\lambda = \frac{0,693}{T_{1/2}}. \quad (4)$$

Подставив (4) в (3), а затем в (2), получим:

$$m = \frac{aMT_{1/2}}{0,693N_A}. \quad (5)$$

Выпишем значения величин, входящих в (5), в СИ:

$$a = 10 \cdot 3,7 \cdot 10^4 \text{ Бк}, M = 32 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}, N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ 1/моль},$$

$$T_{1/2} = 14,28 \cdot 24 \cdot 3600 \text{ с.}$$

Вычислим искомую массу радиоактивного препарата:

$$m = \frac{10 \cdot 3,7 \cdot 10^4 \cdot 32 \cdot 10^{-3} \cdot 14,28 \cdot 24 \cdot 3600}{0,693 \cdot 6,02 \cdot 10^{23}} \text{ кг} = 3,52 \cdot 10^{-14} \text{ кг.}$$

**Ответ:**  $m = 3,52 \cdot 10^{-14} \text{ кг.}$

**Пример 2.** Определить дефект массы  $\Delta m$  и энергию связи ядра атома бора  ${}^{10}_5 \text{B}$ .

**Решение.** Дефект массы ядра представляет собой разность массы нуклонов (протонов и нейтронов), составляющих ядро, и массы ядра и определяется по формуле:

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m_a, \quad (1)$$

где  $Z$  – зарядное число (число протонов в ядре);  $m_p$  – масса протона;  $A$  – массовое число (общее число нуклонов в ядре);  $(A - Z)$  – число нейтронов в ядре;  $m_n$  – масса нейтрона;  $m_a$  – масса ядра.

Числа  $Z$  и  $A$  указываются при написании символа элемента:  $Z$  – слева внизу;  $A$  – слева вверху; в данном случае для бора  $Z = 5$ ,  $A = 10$ . Массу ядра найдем по формуле:

$$m_a = m_a - Zm_e, \quad (2)$$

где  $m_a$  – масса нейтрального атома;  $m_e$  – масса электрона.

Чтобы не вычислять каждый раз массу ядра, преобразуем формулу (1) с учетом (2):

$$\Delta m = Zm_{{}^1 \text{H}} + (A - Z)m_{\text{II}} - m_a \quad (3)$$

Из табл. 9 и 10 выпишем:  $m_{^1H} = 1,00783$  а. е. м.<sup>1</sup>,  $m_{^1H} = 1,00867$  а.е.м.,  $m_a = 10,01294$  а.е.м.

Подставим числовые значения величин, входящих в (3), и вычислим дефект массы ядра бора:

$$\Delta m = 5 \cdot 1,00783 \text{ а.е.м.} + (10 - 5) \cdot 1,00867 \text{ а.е.м.} - 10,01294 \text{ а.е.м.} = 0,06956 \text{ а.е.м.}$$

Энергия связи ядра — энергия, выделяющаяся при образовании ядра в виде электромагнитного излучения, — определяется по формуле

$$E_{CB} = \Delta m c^2, \quad (4)$$

где  $c$  — скорость света в вакууме.

Если энергию связи  $E_{CB}$  выразить в мегаэлектрон - вольтах, дефект массы  $\Delta m$  ядра — в атомных единицах, то формула (4) примет вид:

$$E_{CB} = 931 \Delta m, \quad (5)$$

где 931 — коэффициент, показывающий, какая энергия в мегаэлектрон - вольтах соответствует массе 1 а. е. м.\* Подставив значение  $\Delta m$  в (5), вычислим энергию связи:

$$E_{CB} = 931 \cdot 0,06956 \text{ МэВ} = 64,8 \text{ МэВ.}$$

**Ответ:**  $E_{CB} = 64,8 \text{ МэВ.}$

---

<sup>1</sup> 1 а. е. м. — это обозначение атомной единицы массы, в которой выражаются массы молекул атомов и элементарных частиц, 1 а. е. м. = 112 массы атома изотопа углерода  $^{12}_6 \text{C}$  (1 а.е.м. =  $1,66/10^{-27} \text{ кг}$ )