

**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 :** заочная

## **СОДЕРЖАНИЕ**

<b>1. Конспект лекций .....</b>	<b>3</b>
<b>1.1 Лекция № 1 Кинематика и динамика материальной точки. Система СИ.....</b>	<b>3</b>
<b>1.2 Лекция № 2 Физические основы гемодинамики. Механика сердечно-сосудистой системы. ... ..</b>	<b>19</b>
<b>1.3 Лекция № 3 Физические основы акустики. Биофизика инфразвука. Биофизика ультразвука.....</b>	<b>28</b>
<b>1.4 Лекция № 4 Физические основы термодинамики.....</b>	<b>32</b>
<b>2. Методические указания по выполнению лабораторных работ .....</b>	<b>39</b>
<b>2.1 Лабораторная работа № ЛР-1 Вращательное движение твердого тела.....</b>	<b>39</b>
<b>2.2 Лабораторная работа № ЛР-2 Механические колебания .....</b>	<b>40</b>
<b>2.3 Лабораторная работа № ЛР-3 Электростатика. Законы постоянного тока.....</b>	<b>41</b>
<b>3. Методические указания по проведению практических занятий .....</b>	<b>44</b>
<b>3.1 Практическое занятие № ПЗ-1 Строение атома. Физика атомного ядра .....</b>	<b>44</b>

## 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. двигателя 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:

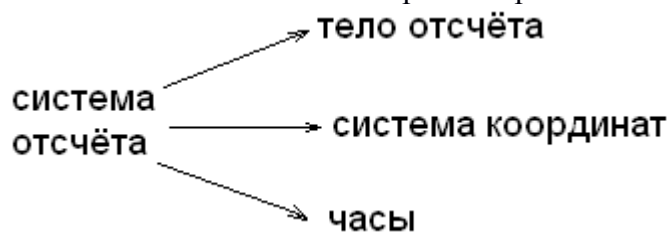
*кинематика* – изучает движение тел вне связи с причинами, которые изменяют это движение;

*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).

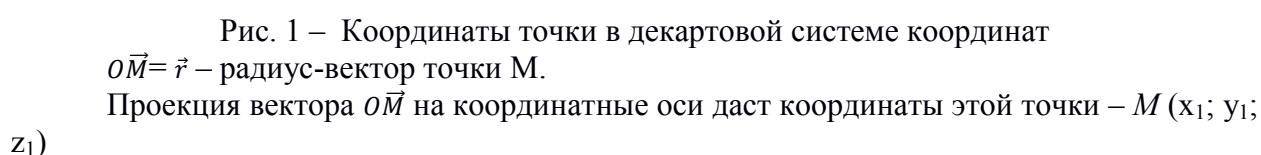
Каждое механическое движение рассматривается относительно вполне определенной системы отсчета. Система отсчета выбирается произвольно.



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).



Запишем параметрические уравнения движения точки:

$$z = z(t)$$

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

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



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  $\Delta t \rightarrow 0$ ).

## 4

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:

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

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

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

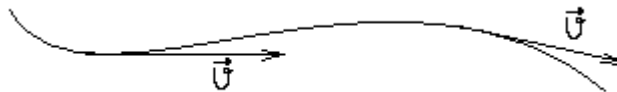


Рис. 3 – Направление вектора скорости

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

### 1.1.3 Ускорение материальной точки

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

*Среднее ускорение* в интервале времени  $\Delta t$  – 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  $a_\tau$  – тангенциальная составляющая ускорения.

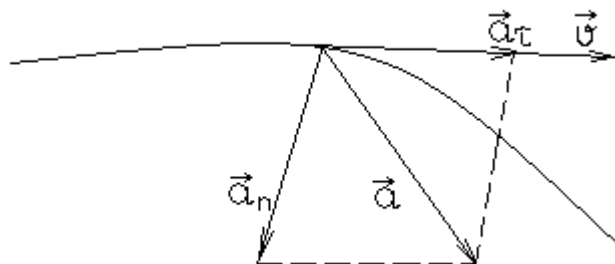


Рис. 4 – Полное ускорение и его составляющие

$a_n$  – 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 связанная с ним, перемещается, оставаясь параллельной самой себе. При этом все точки описывают одинаковую траекторию, имеют одинаковую скорость и ускорение. Помимо поступательного движения, тело (материальная точка) может совершать и вращательное движение.

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

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

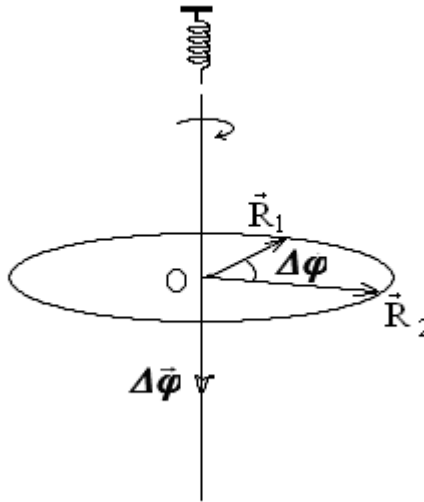


Рис. 5 – Вращение точки по окружности

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

Особенности псевдовекторов:

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

### 1.1.5 Угловая скорость

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

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

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

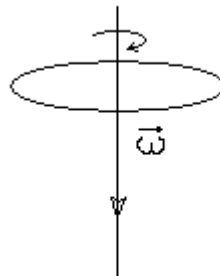


Рис. 6 – Направление угловой скорости

Угол поворота  $\Delta\phi$  и угловую скорость  $\omega$  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  $n$  –  $\text{с}^{-1}$ . 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:

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

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

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

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)  $a_{\tau} = r\beta$
- 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.

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

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

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

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

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

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



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

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

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, II закон Ньютона объединяет 3 физические величины: массу, силу и ускорение.

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

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

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

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

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

Из третьего закона Ньютона следует, что сумма внутренних воздействий в замкнутой системе равна нулю, а значит, система тел может получить ускорение только за

счет внешних воздействий. Для движущейся системы так же справедлив второй закон Ньютона, только если система движется равномерно, прямолинейно и со скоростью, много меньшей скорости света.

### 1.2.2 Импульс тела. Закон сохранения импульса в изолированной системе

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

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

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

Поскольку:

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

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

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

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

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

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

### 3. Механическая работа, энергия, мощность.

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

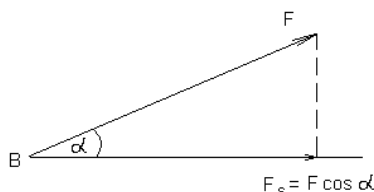


Рис. 7

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

Для характеристики перемещающего действия силы вводится понятие *работы*.

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

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

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

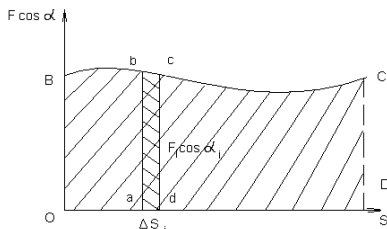


Рис. 8

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  $F_y = -k\Delta x$  – Закон Гука.

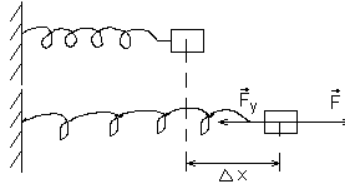


Рис. 9

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

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

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

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

### 6.3.2. Потенциальная энергия гравитационного взаимодействия

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

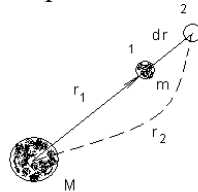


Рис. 10

На тело  $m$  действует сила  $F = \gamma \frac{mM}{r^2}$ , которая изменяется с расстоянием. Если тело переместится из точки 2 в точку 1, то совершится работа:  $A = \int_1^2 F dr = \int_1^2 \gamma \frac{mM}{r^2} dr = \gamma mM \int_1^2 \frac{dr}{r^2} \Rightarrow A = \gamma \frac{mM}{r_2} - \gamma \frac{mM}{r_1} = -\Delta E_n \quad (6.2)$

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

Проанализируем полученную формулу:

- 1) Работа не зависит от формы пути, зависит от начальной и конечной точки перемещения;
  - а) Если работа не зависит от формы пути, такие системы называются *потенциальными* или *консервативными*. Действующие в них силы называются потенциальными. В таких системах не происходит перехода механической энергии в другие виды энергии;
  - б) Системы, в которых работа зависит от формы пути, называются *диссипативными*, в таких системах существует переход механической энергии в другие виды энергии;
  - в) Если в любой точке рассматриваемого пространства на тело действует сила, то говорят, что имеем дело с силовым полем. Если силы направлены к общей точке, то поле называют *центральным*;
  - г) Если силы в данной области пространства одинаковы по величине и направлению, поле называют *однородным* (таковым является гравитационное поле около Земли);
  - д) Если потенциальная энергия постоянна по времени, то поле называется *стационарным*.
- 2) Работа равна разности энергии тела в двух точках поля.

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

В СИ единицей измерения энергии является Джоуль (Дж).

*Область измерения энергии в Дж:*

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

#### 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  $c = 299\,792\,458$  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  $2 \cdot 10^{-7}$  Н.

*Из этого следует, что магнитная постоянная  $\mu_0$  (известная так же как магнитная проницаемость в вакууме) равна точно  $4\pi \cdot 10^{-7}$  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,  $T_{\text{TP}} T_{\text{TPW}}$ , 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,  $M(^{12}\text{C})$  ( $^{12}\text{C}$ ), 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* настерадиан.

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 определения физической величины, 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, Дж,  $t$  – время, с.

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

$$A = F \cdot S,$$

где  $F$  – сила, Н,  $S$  – путь, м.

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

$$F = ma,$$

где  $a$  – ускорение, м/с<sup>2</sup>,  $m$  – масса, 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	$\text{м/с}$
Ускорение	$a$	Метр в секунду в квадрате	$\text{м/с}^2$
Волновое число	$k$	Метр в минус первой степени	$\text{м}^{-1}$
Плотность объемная	$\rho$	Килограмм на метр кубический	$\text{кг/м}^3$
Поверхностная плотность	$\rho_s$	Килограмм на метр квадратный	$\text{кг/м}^2$
Удельный объем	$V_{\text{уд}}$	Кубический метр на килограмм	$\text{м}^3/\text{кг}$
Плотность силы электрического тока	$j$	Ампер на метр квадратный	$\text{А/м}^2$
Напряженность магнитного поля	$H$	Ампер на метр	$\text{А/м}$
Молярная концентрация	$c$	Моль на метр кубический	$\text{моль/м}^3$



Яркость	$L_v$	Кандела на метр квадратный	$\text{кд}/\text{м}^2$
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	Радан	<i>Рад</i>	$\text{м}/\text{м} = 1$
Телесный угол	Стерadian	<i>Ср</i>	$\text{м}^2/\text{м}^2 = 1$
Частота	Герц	<i>Гц</i>	$\text{с}^{-1}$
Сила	Ньютон	<i>Н</i>	$\text{кг м с}^{-2}$
Давление	Паскаль	<i>Па</i>	$\text{Н}/\text{м}^2 = \text{м}^{-1}\text{кгс}^{-2}$
Энергия, работа	Джоуль	<i>Дж</i>	$\text{Нм} = \text{м}^2\text{кгс}^{-2}$
Мощность, поток излучения	Ватт	<i>Вт</i>	$\text{Дж}/\text{с} = \text{м}^2\text{кгс}^{-3}$ $\text{м}^2\text{кгс}^{-3}$
Электрический заряд, количество электричества	Кулон	<i>Кл</i>	$\text{А} \cdot \text{с}$
Разность электр. потенциалов	Вольт	<i>В</i>	$\text{Вт}/\text{А} = \text{м}^2\text{кгс}^{-3}\text{А}^{-1}$ $\text{м}^2\text{кгс}^{-3}\text{А}^{-1}$
1	2	3	4
Электрическая емкость	фарад	<i>Ф</i>	$\text{Кл}/\text{В} = \text{м}^2\text{кг}^{-1}\text{с}^4\text{А}^2$ $\text{с}^4\text{А}^2\text{м}^2\text{кг}^{-1}\text{с}^4\text{А}^2$
Электрическое	Ом	<i>Ом</i>	$\text{В}/\text{А} = \text{м}^2\text{кг}^{-1}\text{с}^{-3}\text{А}^{-2}$



сопротивление			$^2\text{м}^2\text{кгс}^{-3}\text{А}^{-2}$
Электрическая проводимость	сименс	$Cм$	$A/B = \text{м}^{-2}\text{кг}^{-1}\text{с}^3\text{А}^2$
Магнитный поток	вебер	$Bб$	$B \cdot c = \text{м}^2\text{кгс}^{-2}\text{А}^{-1}$
Плотность магнитного потока	тесла	$Tл$	$Bб \setminus \text{м}^2 = \text{кгс}^{-1}\text{А}^{-1}$
Индуктивность	генри	$Гн$	$Bб \setminus A = \text{м}^2\text{кгс}^{-2}\text{А}^{-2}$
Световой поток	люмен	$лм$	$Kд \cdot cр = \text{кд}$
Освещенность	люкс	$лк$	$лм / \text{м}^2 = \text{м}^{-2}\text{кд} \text{м}^2 = \text{м}^{-2}\text{кд}$
Активность (радиоактивного источника)	беккерель	$Бк$	$\text{с}^{-1}$
Поглощенная доза ионизирующего излучения	грей	$гр$	$Дж/кг = \text{м}^2\text{с}^{-2}\text{м}^2\text{с}^{-2}$
Эквивалентная доза, амбиентная эквивалентная доза	зиверт	$Зв$	$Дж / \text{кг} = \text{м}^2\text{с}^{-2}$

Для каждой величины существует только одна определенная единица СИ (например, единица СИ  $Дж/К$  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,  $^{\circ}\text{C}$ , равный по величине Кельвину,  $K$ , единице термодинамической температуры. Величина температуры Цельсия  $t^{\circ}\text{C}$  связана с термодинамической температурой  $TK$  и определяется уравнением:  $t^{\circ}\text{C} = TK - 273,15$ .

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 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:

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

*Решение.*

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

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

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	Обозначение	Множитель	Наименование	Обозначение
1	2	3	4	5	5

$10^1 10^1$	дека	да	$10^{-1} 10^{-1}$	деци	д
$10^2 10^2$	гекто	г	$10^{-2} 10^{-2}$	санتي	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*, микровольт как *мкВ*, фемтосекунда как *фс*.  
 $10^{-2} \cdot 10^{-1} = 5000 \text{ В}$

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 приставку присоединяют не к килограмму, а к грамму, и, таким образом, следует писать, например, миллиграмм, *мг*, а не микрокилограмм, *мккг*.

## Лекция №2 (2 часа)

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

### 1.2.1 Вопросы лекции:

1. Гидродинамика идеальной жидкости. Стационарный поток. Уравнение неразрывности потока. Уравнение Бернулли и следствия из него.
2. Гидродинамика вязкой жидкости. Формула Ньютона. Коэффициент вязкости и методы его измерения на основе законов Стокса и Пуазейля.
3. Физические свойства крови. Кровь, как неньютоновская жидкость. Вычисление работы сердца. Физическая модель сосудистой системы. Перераспределение энергии в эластичных стенках кровеносных сосудов и значение этого явления для кровообращения. Пульсовая волна.
4. Гидростатическое давление крови. Физические основы методов измерения артериального давления.

### 1.2.2 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 *идеальной жидкостью*.

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

Для идеальной жидкости важно выполнение двух условий:

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

2)  $\eta = 0$

### 13.2. Основные понятия механики жидкостей

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

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

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

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

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

### 13.3. Уравнение неразрывности струи

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

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

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

Величина  $Q = S \cdot v$ , численно равная объёму жидкости, протекающей в единицу времени через поперечное сечение потока, называется *объёмным расходом жидкости*. Измеряется в м<sup>3</sup>/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 м<sup>2</sup>.

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

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

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

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

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

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

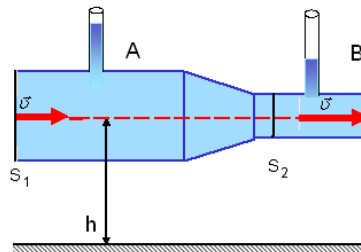
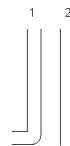


Рис. 25

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

$$P_{дин} = P - P_{ст} \quad (14.4)$$



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

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

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

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:

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

(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 объёмной 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 объёмную скорость течения жидкости с разностью давления в начале и конце трубки как движущей силой потока, вязкостью жидкости, радиусом и длиной трубки. 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 ( $\text{м}^3/\text{с}$ ),  $(P_1 - P_2)$  - различие давления через концы трубки ( $\text{Па}$ ),  $r$  - внутренний радиус трубки ( $\text{м}$ ),  $l$  - длина трубки ( $\text{м}$ ),  $\eta$  - вязкость жидкости ( $\text{Па} \cdot \text{с}$ ).

Закон Пуазейля показывает, что величина  $Q$  пропорциональна разнице давления  $P_1 - P_2$  в начале и конце трубки. 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 зависима от радиуса трубки. 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 трубки 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 трубки 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 четвертую 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 объёмов 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 ( $\eta$ ) прямо пропорциональна величине напряжения сдвига ( $\tau$ ) и обратно пропорциональна разнице скоростей движения слоёв ( $v$ ):  $\eta = \tau / \gamma$ . 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 (систола) до минимального во время расслабления (диастола). 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 прекратится 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 *эходоплерографии*. 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.

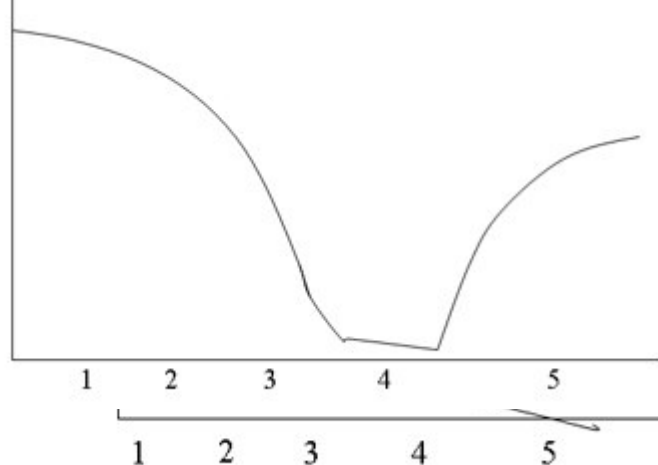
(2) Вторая – общее сопротивление ( $R$ ) кровеносной системы.

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.

0,2 м/с



**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 переходя 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 №3 (2 часа)

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

#### 1.3.1 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.

#### 1.3.2 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. Свое применение он

нашел во время первой мировой войны, когда К.В. Шиловский и П. Ланжевен разработали сонар, использовавшийся для навигации судов, определения расстояния для цели и поиска подводных лодок. В 1929 году С.Я. Соколов применил ультразвук для неразрушающего контроля в металлургии (дефектоскопия). Этот крупнейший советский физик-акустик явился родоначальником ультразвуковой интроскопии и автором наиболее часто используемых и совершенно различных по своей сути методов современного звуковидения.

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

#### **Биофизика ультразвука.**

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

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

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

Материал

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

Мягкие ткани (в среднем)

1540

Головной мозг

1541

Жир

1450

Печень

1549

Почка

1561

Мышцы

1585

Кости черепа

4080

Для различных типов ультразвуковых исследований применяются разные виды ультразвуковых волн. Наиболее важными параметрами являются частота излучения, диаметр поверхности трандьюсера 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, цунами. При помощи достаточно 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 инфразвуковые волны в воздухе, воде и в земной коре могут распространяться на очень дальние 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 стреляющего орудия. Звуки взрывов, содержащие большое количество инфразвуковых частот, применяются для исследования верхних слоев атмосферы, свойств водной среды.

### **Физиологическое действие инфразвука**

Органы человека, как и любое физическое тело, имеют собственную резонансную частоту. Под воздействием звука с этой частотой они могут испытывать внутреннее изменение стр

уктуры, вплоть до потери собственной работоспособности. Предполагается, что на этом принципе может быть создано инфразвуковое оружие. Также при совпадении воздействующего звука с ритмами мозга, такими как альфа-ритм, бета-ритм, гамма-ритм, дельта-ритм, тета-ритм, каппа-ритм, мю-ритм, сигма-ритм и др., может возникнуть нарушение активности церебральных механизмов мозга.

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

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

совпадение частот приводит к возникновению резонанса <sup>[источник не указан 73 дня]</sup>.

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

### **Физиологическое действие инфразвука на открытом пространстве**

Рассмотрим в качестве примера вредную для человеческого организма стоячую волну частотой в 7 Гц, названную академиком Шулейкиным голос моря <sup>[2]</sup>, образующуюся по принципу, схожему с образованием стоячей волны в трубе, у которой один конец открыт, а другой закрыт. Для такой трубы, открытой с одного конца, основная частота  $f = v/4L$ , где  $v$  — скорость звука в среде,  $L$  —

длина трубы. Таким образом, опасный для человека инфразвук может образовываться в море с глубиной в  $h = v/4f + k \cdot v/f$  ( $k=0, 1, 2, 3...$ ) и ровным донным рельефом, что соответствует глубинам около  $50 + 200 \cdot k$  метров, в зависимости от солёности и температуры воды.

### **Физиологическое действие инфразвука в помещении**

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

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

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

Экспериментально показано, что нахождение в разных частях даже небольшого помещения способно вызывать разнонаправленную реакцию органов и систем человека и животных. Выделена зона градиента ИЗ волны, в которой падает работоспособность, уменьшается частота различия звуковых импульсов и световых мельканий, резко активизируется активность с

импатического звена регуляции сосудистой системы и развивается реакция гиперкоагуляции крови. Это связано с прямым действием ИЗ на стенки кровеносных сосудов<sup>[источник не указан 439 дней]</sup>.

В то же время у людей и животных, находящихся в противоположном конце помещения, умеренно, но статистически достоверно, растёт 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 безопасен 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 захлёстывает их. Каждое такое захлопывание воды на гребне волны порождает акустический удар, создаются инфразвуковые колебания, расходящиеся на сотни километров, их улавливает медуза. Купол медузы усиливает инфразвуковые колебания, как рупор, и 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 инфрауха медузы. Такой прибор может предупредить о надвигающейся буре за 15 часов, а не за два, как обычный морской барометр.

## **Лекция №4 (2 часа)**

**Тема:** «Физические основы термодинамики.»

### **1.4.1 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.

### **1.4.2 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<sub>уд</sub>*– 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.

4) Аддитивность.

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

*Работа*

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

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

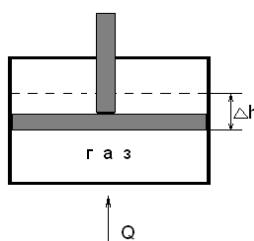


Рис. 8

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

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

В случае если  $P = \text{const}$ :

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

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  $\delta Q = 0$ :

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

Внутренняя энергия меняется только за счёт совершения работы.

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

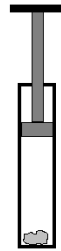


Рис. 9

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

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

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

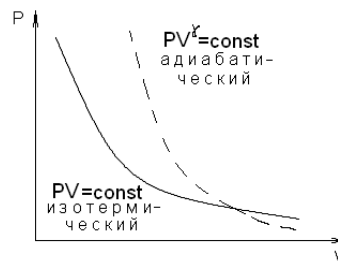


Рис. 10

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

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

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

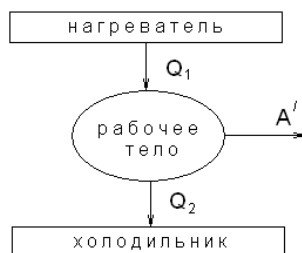


Рис. 11

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

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

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

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

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

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

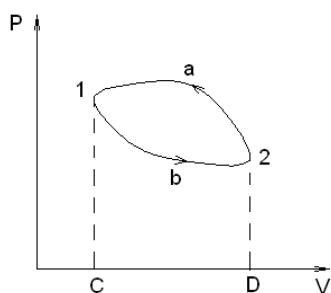


Рис. 12 – Круговой процесс

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

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

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

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

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

Размеры молекул  $d=10^{-10}$  м, а взаимодействия 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.

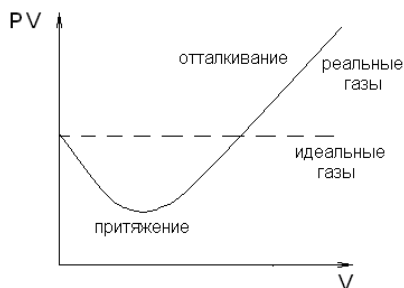


Рис. 14

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 большого давления преобладают силы отталкивания, газ занимает больший объём и кривая идёт выше.

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

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

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

Ввел поправки, учитывающие размеры молекул и их взаимодействие:

- 1) Так как молекулы имеют собственный 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:

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

Здесь  $a$  – поправка, характеризующая взаимодействие молекул.

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

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

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

Уравнение состояния реального газа любой массы имеет вид:

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

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

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

*Изотермы Ван-дер-Ваальса и экспериментальные изотермы Эндрюса*

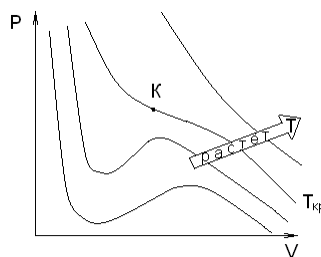


Рис. 15

На рисунке 15 представлены теоретические изотермы Ван – дер – Ваальса. Точка перегиба К называется критической точкой, т.е. переход газа в жидкость (или наоборот) осуществляется мгновенно. Критическая температура  $T_{кр}$  – это максимальная температура, при которой вещество ещё может оставаться жидким. В критической точке и не газ и не жидкость, а вещество в особом состоянии. При  $T_{кр}$  никаким сжатием газ нельзя перевести в жидкое состояние. При температурах выше  $T_{кр}$  изотермы реального газа похожи на изотермы идеального газа.

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

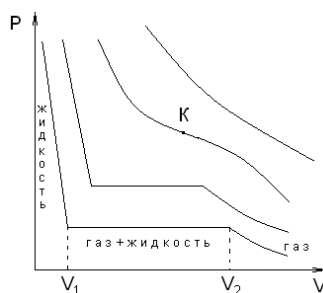


Рис. 16

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

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

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

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

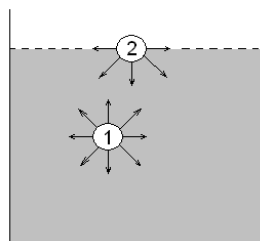


Рис. 17

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

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

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

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:

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

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  $1 \text{ м}^2$ :

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

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

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.

## 2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

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

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

**2.1.1 Цель работы:** Определить момент инерции шатуна используя теорему Штейнера

#### 2.1.2 Задачи работы:

1. Применить теорему Штейнера на практике
2. Ознакомиться с понятием момента инерции твердого тела.

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

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

#### 2.1.4 Описание (ход) работы:

1. Значение массы шатуна выбито на шатуне в граммах. По этому значению вычислить вес шатуна в Ньютонах в положении равновесия.
2. Отметить на шатуне центр тяжести  $O$ . Для этого шатун подвесить на крючках так, как показано на рис. 1 а. Положение центра тяжести определится как точка пересечения отвесной линии с осью симметрии шатуна.

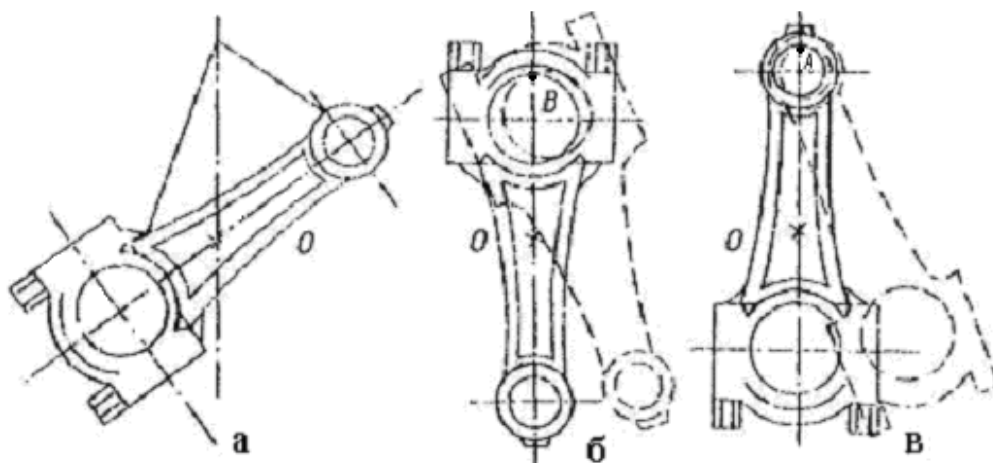


Рис. 1

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

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

5. Вычислить момент инерции шатуна относительно оси, проходящей через точку В ( $J_B$ ) по формуле (2).

6. Подвесить шатун так, как это показано на рис. 1 в (ось вращения шатуна проходит через точку А), и аналогично описанному выше определить период колебаний шатуна ( $T_A$ ), расстояние  $r_{AO} = AO$  и вычислить момент инерции шатуна относительно оси, проходящей через точку А ( $J_A$ ).

7. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу.

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

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

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

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

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

**Тема:** «Механические колебания»

**2.2.1 Цель работы:** Определить коэффициент жесткости пружины различными способами

### 2.2.2 Задачи работы:

1. Определить коэффициент жесткости пружины по колебаниям
2. Определить коэффициент жесткости пружины по деформациям

### 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 <sub>ср</sub>

4. По результатам опытов построить график зависимости деформирующей силы от смещения  $F=f(x)$ .
5. Вычислить величину  $k = mg/x$ , а затем рассчитать  $k_{ср}$ .

**Задание 2.** Изучение зависимости периода колебаний пружинного маятника от его массы.

1. Слегка оттянуть пружину с грузом и отпустить. С помощью секундомера определить время 20 полных колебаний маятника и рассчитать период колебания  $T_1 = \frac{t_1}{20}$ .
2. Прodelать то же самое, навешивая 2 груза вместе, затем 3 груза и т.д.

№ п/п	m	n	t	T
1.				
2.				
3.				



3. По данным опыта построить график зависимости периода  $T$  колебаний груза от его массы  $m$  ( $T = f(m)$ ).

**Задание 3.** По формуле  $k' = \omega^2 m = \frac{4\pi^2 m}{T^2}$  рассчитать значение  $k'$  для 3-х нагрузок и вычислить  $k'_{\text{ср}}$ . 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:** «Электростатика. Законы постоянного тока»

**2.3.1 Цель работы:** Выяснение соотношений между напряжением, токами, сопротивлениями при параллельном и последовательном соединении проводников, а также расчет мощностей на каждом из участков цепи и общей потребляемой мощности при тех же соединениях.

#### 2.3.2 Задачи работы:

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

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

- 1) амперметр, 2) вольтметр, 3) набор сопротивлений, 4) соединительные провода, 5) источник тока (12В).

#### 2.3.4 Описание (ход) работы:

**ЗАДАНИЕ 1:**

1. Знакомятся с приборами, записывают основные технические характеристики измерительных приборов.
2. Определяют цену деления прибора, для многопредельных приборов определяют цену деления на каждом пределе.
3. Собирают схему (рис.3) последовательного соединения проводников.



Вольтметр подключается параллельно тому участку, где нужно измерить напряжение.

4. Присоединяя провода к зажимам сопротивлений измеряют падение напряжения на каждом сопротивлении + цепи. Измеряют силу тока (ток во всех участках должен быть одинаков).

Примечание: показания амметра записывают при отключенном вольтметре.

5. Убеждаются, что  $U = U_1 + U_2 + U_3$

$$R_1 = R_1 + R_2 + R_3$$

$$\left( R_1 = \frac{U_1}{I}; R_2 = \frac{U_2}{I}; R_3 = \frac{U_3}{I}; R = \frac{U}{I} \right)$$

где  $P$  – общая мощность ( $P = P_1 + P_2 + P_3$ )

$P_i$ - мощность, развиваемая на отдельных участках.

$$(P_1 = IU_1, P_2 = IU_2, P_3 = IU_3)$$

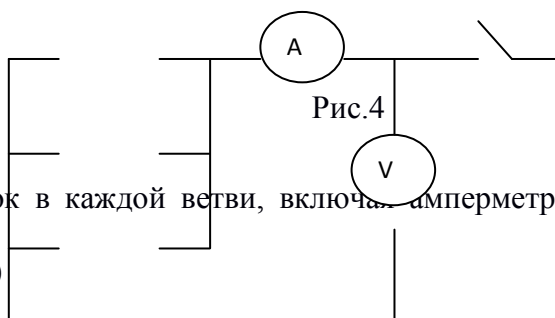
6. Результаты измерений и вычислений записывают в таблицу.

Таблица 1

Соединение	U(В)	I(А)	P(Вт)	R(Ом)
последовательное				
Сопротивление 1				
Сопротивление 2				
Сопротивление 3				
Вся цепь (данные опыта)				
Вся цепь (вычисления)				

## ЗАДАНИЕ 2:

1. Собирают схему (рис.4) и измеряют общее напряжение и общую силу тока.



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



б)

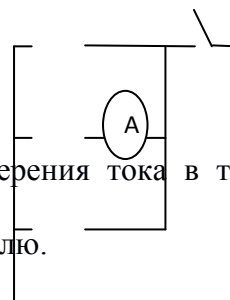


Рис.5

По аналогии со схемами «а» и «б» собирают схему для измерения тока в третьем сопротивлении, предварительно начертив и показав ее преподавателю.

3. Составляют таблицу для занесения данных, полученных при измерении характеристик проводников и токов при параллельном соединении.

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

$$R_{теор} = R_{эксп}, \frac{1}{R_{теор}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

5. Составляют отчет по работе и делают выводы.

### 3. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ПРОВЕДЕНИЮ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

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

**Тема:** «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
Серийная формула для атома водорода	$\nu = \frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right)$
Период полураспада	$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}$
Активность радиоактивного изотопа	$a = \lambda N = N \frac{0,693}{T_{1/2}}$
Дефект массы ядра	$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m_{\text{я}}$ $\Delta m = Zm_{\text{H}} + (A - Z)m_n - m_A$
Энергия связи ядра	$E_{\text{CB}} = \Delta mc^2, \quad E_{\text{CB}} = 931 \Delta m$
Удельная энергия связи	$\varepsilon = \frac{E_{\text{CB}}}{A}$

#### *Примеры решения задач*

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

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

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:

$$a = 10 \cdot 3,7 \cdot 10^4 \text{ Бк}, M = 32 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}, N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ л/моль}, \\ T_{1/2} = 14,28 \cdot 24 \cdot 3600 \text{ с}.$$

Вычислим искомую массу радиоактивного препарата:

$$m = \frac{10 \cdot 3,7 \cdot 10^4 \cdot 32 \cdot 10^{-2} \cdot 14,28 \cdot 24 \cdot 3600}{0,693 \cdot 6,02 \cdot 10^{23}} \text{ кг} = 3,52 \cdot 10^{-14} \text{ кг}.$$

**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:

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m_{\text{я}}, \quad (1)$$

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;  $m_{\text{я}}$  – масса ядра.

Числа  $Z$  и  $A$  указываются при написании символа элемента:  $Z$  — слева внизу;  $A$  – слева сверху; в данном случае для бора  $Z = 5$ ,  $A = 10$ . Массу ядра найдем по формуле:

$$m_{\text{я}} = m_{\text{а}} - Zm_e, \quad (2)$$

где  $m_{\text{а}}$  – масса нейтрального атома;  $m_e$  – масса электрона.

Чтобы не вычислять каждый раз массу ядра, преобразуем формулу (1) с учетом (2):

$$\Delta m = Zm_{\text{п}} + (A - Z)m_{\text{н}} - m_{\text{а}} \quad (3)$$

Из табл. 9 и 10 выпишем:  $m_{\frac{1}{2}H} = 1,00783 \text{ а. е. м.}^1$ ,  $m_{\Pi} = 1,00867 \text{ а.е.м.}$ ,  $m_a = 10,01294 \text{ а.е.м.}$

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. =  $\frac{1}{12}$  массы атома изотопа углерода  $^{12}_6\text{C}$  (1 а.е.м =  $1,66 \cdot 10^{-27}$  кг)